



МІНІСТЕРСТВО
ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ



Національний
університет
Дніпровська
політехніка
1899



ПІВДЕННЕ
конструкторське бюро



I МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕХАНІКИ У КОНСТРУКЦІЯХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

**MODERN PROBLEMS OF MECHANICS IN
SPECIAL PURPOSE STRUCTURES**

(міжнародна науково-технічна конференція)

26-28 березня 2025

**ЗБІРНИК
МАТЕРІАЛІВ КОНФЕРЕНЦІЇ**



м. Дніпро
2025

Збірник наукових праць I міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми механіки у конструкціях спеціального призначення», 26-28 березня 2025 р., Дніпро: – НТУ «Дніпровська політехніка», 2025. – 451 с.

Збірник містить науково-методичні праці як відомих так і молодих вчених, академіків, член-кореспондентів, професори, кандидати наук, доценти наукові співробітники, аспіранти.

Всю повноту відповідальності за зміст наданих матеріалів і сам факт їх публікації несуть автори. Редакція збірника праць може не поділяти думку авторів і не несе відповідальності за недостовірність інформації, що публікується. Редакція не несе ніякої відповідальності перед авторами і/або третіми особами і організаціями за можливі збитки, викликаний публікацією матеріалів.

Modern problems of mechanics in special purpose structures. Conference Proceedings.
(2025) Ukraine, Dnipro: DUT, 451 p.

The collection contains scientific and methodological works of both famous and young scientists, academicians, corresponding members, professors, candidates of sciences, associate professors, research fellows, postgraduate students.

Authors are notified, that it is the responsibility of the authors, not the publisher, to determine whether disclosure of their material requires the prior consent of other parties and, if so, to obtain it. Authors are also advised that it shall be acknowledged that statements and opinions given in work published by this collection are the expression of the authors. Responsibility for the content of published papers rests upon the authors, not the publisher.



Локальний організаційний комітет**Організатори конференції:**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко НАН України

Голова оргкомітету:

Кубенко В.Д. академік НАН України, д.ф.-м.н., професор (м. Київ)

Співголови оргкомітету:

Півняк Г.Г. академік НАН України, д.т.н., професор (м. Дніпро)
Азюковский О.О. ректор НТУ «Дніпровська політехніка»

Заступники голови:

Гришак В.З. д.т.н., професор (м. Дніпро)
Дзюба А.П. д.т.н., професор (м. Дніпро)

Вчений секретар:

Долгов О.М. к.т.н., професор (м. Дніпро)

Члени оргкомітету:

Богданов В.Л. академік НАН України, д.ф.-м.н., професор (м. Київ)
Бобир М.І. академік НАН України, д.т.н., професор (м. Київ);
Булат А.Ф. академік НАН України, д.т.н., професор, (м. Дніпро);
Бондарь М.А. генеральний директор ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» (м. Дніпро);
Войт С.М. генеральний директор ДП «Південний машинобудівний завод» ім. О.М. Макарова (м. Дніпро);
Кушнір Р.М. академік НАН України, д.ф.-м.н., професор (м. Львів);
Назаренко В.М. академік НАН України, д.т.н., професор (м. Київ);
Токовий Ю.В. член-кореспондент НАН України, д.ф.-м.н., професор (м. Львів);
Кисельова О.М. член-кореспондент НАН України, д.ф.-м.н., професор (м. Дніпро);
Нікітенко І.С., проректор з наукової роботи НТУ «Дніпровська політехніка»
Алексєєнко С.В. д.т.н., професор (м.Дніпро);
Шейко Т.І. д.т.н., професор (м. Харків);
Бреславський Д.В. д.т.н., професор (м. Харків);
Євдокімов В.В. д.е.н., професор (м. Житомир);
Каіров О.С. д.т.н., професор (м. Миколаїв);
Максименко-Шейко К. В. д.т.н., професор (м. Харків);
Пожуєв В.І. д.ф.-м.н., професор (м. Запоріжжя);
Сіренко В.М. начальник комплексу ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля», (м. Дніпро).



Зміст

ДО УЧАСНИКІВ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ MPMSPS - 2025.....	9
ПЛЕНАРНЕ ЗАСІДАННЯ.....	10
Nonlinear damping in large-amplitude vibrations of shells and plates	10
Нестационарні хвильові процеси в акустичному шарі –плоска і вісесиметрична задачі	13
Моделі та методи для визначення термонапружень у пружних багатошарових тілах	17
Single shaft gas turbine engine rotor dynamic stresses determination	20
Гібридний асимптотико-чисельний підхід до розв'язку задач механіки конструкцій із змінними параметрами цільового призначення	23
Математичне та комп'ютерне моделювання механічної поведінки навантажених елементів конструкцій ракетно-космічної техніки.....	28
Контактна взаємодія п'єзоелектричних тіл з врахуванням впливу неоднорідних температурних полів, фрикційного тепловиділення, дефектів на границі поділу	32
Керування конструкціями з рідиною на основі компенсації силового відгуку рідини.....	36
СЕКЦІЯ 1. ТЕОРЕТИЧНІ І ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ МЕХАНІКИ ТА МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.	40
Experimental and numerical analysis of mechanical characteristics of fused deposition processed sandwich thin-walled structures	40
Застосування теорії-г функцій до аналізу вільних коливань сендвіч пластин з ауксетичним стільниковим заповнювачем	43
Прогнозування руйнівних навантажень конструкцій різного спрямування у реальних умовах експлуатації	47
Підвищення фізико-механічних характеристик сплавів системи al-mg для конструкцій спеціального призначення.....	51
Функціональна здатність оболонкових конструкцій в умовах комбінованого зовнішнього навантаження з урахуванням експлуатаційних особливостей.....	55
Вільні коливання шестикутних пластин з отвором	60
Постановка і розв'язок нелінійної задачі зовнішньої балістики систем із змінними за часом параметрами в умовах вітрового навантаження.....	63
Стиск кусково-однорідної півплощини з двох різних вискоеластичних матеріалів вздовж міжфазної зони гладкого проковзування	68
Аналіз термонапруженого стану багатошарового скління літаків.....	72
До задачі дослідження дискретних значень ядер спадковості в області сингулярності в нелінійній спадковій теорії	76
Адгезійна взаємодія мікротекстурованої жорсткої основи та пружного півпростору за контакту поверхонь в межах інтерфейсних зазорів	79
Відпрацювання міцності паливного відсіку третього ступеня рн «циклон-4» на режими навантаження виробів 5000, 7000 під час стендових випробувань розрахунковим шляхом із використанням програм скінченно-елементного аналізу та шляхом проведення попередніх статичних випробувань.....	83
Методика випробувань градієнтно-навантажених конструкцій та матеріалів	86



Дослідження можливості заміни контактного ультразвукового амплітудного тіньового методу контролю на теплографічний	90
Оцінка можливості застосування полімерів як конструкційних матеріалів для ракет-носіїв надлегкого класу	93
Методичні основи експлуатації літальних апаратів поза межами встановлених ресурсних показників	96
Математична модель прогнозу експлуатаційної міцності конструкції планера старіючих повітряних суден після виконання капітального ремонту	100
Втрата стійкості тонкої жорсткої плівки на податливій нестисливій підкладці при стиску вздовж міжфазного відшарування	104
Контактні напруження в тілах з виїмками різної форми за послідовного та пропорційного навантажень	108
Research on laser cladding repair and engineering application of high-strength precipitation-hardening steel xm-25	112
Сучасні аспекти забезпечення справності авіаційних двигунів	115
Дослідження впливу товщини зразка на міцність флоат-скла в умовах чистого згину	119
Асимптотичне моделювання навантажень у вузлі з'єднання лопатей вітряка до хабу з композиційних матеріалів	123
Сучасні технології зниження аеродинамічного шуму лопатей вітрових турбін.....	128
Вплив метеорологічних умов на роботу малих безпілотних літальних апаратів	133
Чисельне дослідження напружено-деформованого стану конструктивно неоднорідної циліндричної оболонки при динамічному навантаженні	137
Застосування неоднорідних конструкцій для сейсмічного та віброційного захисту	141
Вплив конфігурації круглих включень на затухання хвиль у композитній балці	144
Перспективні конструкції баштових споруд для протиповітряної оборони	147
Вплив заліковування тріщини в анізотропній пластині на коефіцієнти інтенсивності напружень	150
Аналіз крихкого та пластичного руйнування оболонок при високоенергетичному механічному впливі.....	154
Корозійна стійкість титанових сплавів, отриманих методами адитивних технологій.....	159
Гранична рівновага трансверсально-ізотропного тіла із залікованою дископодібною тріщиною	163
Використання варіаційного принципу ху – васідзу в задачах стійкості нетонких анізотропних циліндричних оболонок з композитних матеріалів в просторовій постановці.....	167
Стійкість нетонких анізотропних циліндричних оболонок, захищених функціонально-градієнтним матеріалом, під дією бокового тиску.....	171
Дослідження динаміки транспортного засобу з дворівневою амортизацією	175
Регульовальні параметри, що визначають силовий вплив на матеріал у вібраційній шоківій дробарці з похилою камерою дроблення	178
Структурний аналіз просторових важільних механізмів	182
Задача зношування основи вінклерівського типу прямокутним в плані штампом	186
Огляд сучасних пристроїв для перевантаження об'єктів транспортування	190



Аналіз конструкцій робототехнічних пристроїв транспортно-логістичних систем.....	194
Algorithm for evaluating stress-strain state of rigid fibers in composite stay rope.....	197
СЕКЦІЯ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ І СИСТЕМ НОВОЇ ТЕХНІКИ.	202
Експериментальне моделювання процесів руйнування навантажених оболонкових конструкцій під дією удару відокремленою масою.....	202
Експериментальні дослідження жорсткісних характеристик багатошарових сейсмосахисних елементів	205
Збільшення ресурсних показників втулково-роликових ланцюгів, які використовуються на вертольотах	209
Аналіз схем випробування корпусу рдтп на міцність внутрішнім тиском.....	213
Напружено-деформований стан арматури люка днища корпусу типу «кокон» з композиційних матеріалів.....	216
Про взаємодію шарів композитного матеріалу при крученні.....	219
Визначення характеристик приповерхневих шарів матеріалу на основі багаточастотного зондування поверхневими акустичними хвилями. огляд.....	222
Прогнозування кінетики зростання короткої втомної тріщини у металевих матеріалах за циклічного навантаження зі змінним розмахом напружень	227
Числове моделювання проникнення засобів ураження в матеріал, імітуючий біологічні тканини, та тонкостінні захисні елементи	231
Про експериментальне дослідження ударних хвиль у водяному кулеуловлювачі.....	236
визначення початкового дефекту матеріалу при розрахунках циклічної довговічності	240
Розробка маніпулятора космічного призначення із раціональними параметрами	244
Порівняльний аналіз характеристик міцності вітчизняних композитних матеріалів на поліуретановій основі: випробування матеріалів дк2 і ак.ур-03	248
До методики експерименту дослідження розподілу температури у середовищі з особливостями	252
СЕКЦІЯ 3. МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ І МАТЕРІАЛІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.	255
Чисельне моделювання напруженого стану тришарового суцільного циліндра з неперервно-неоднорідним заповнювачем за рівномірного стиску бічної поверхні.....	255
Моделювання багатогранників кристалічної структури матеріалів на основі симетричних перетворень засобами cad-систем.....	259
Скінченноелементний аналіз параметрів руйнування частково електродованої тріщини в п'єзоелектричному матеріалі	263
Modeling and assesment of the sports exoprostheses load-bearing capacity.....	267
Kinematics, vibration activity and reliability of the hexapod type dynamic platform as part of training equipment.....	271
Математична модель флаттера податливих до трансверсального зсуву пластин-смуг та її реалізація.....	277
Чисельне моделювання напружено-деформованого стану конструкцій із композиційного матеріалу з порожнистими волокнами при дії температури.....	281



Дослідження граничних станів тонкостінних оболонкових конструкцій за допомогою чисельного моделювання	284
Математичне моделювання нелінійного деформування елементів конструкцій спеціального призначення в процесах термосилового навантаження	287
Аналіз складних систем на основі мереж байєса	291
Модель тестування військової техніки на основі граничних значень	293
Стійкість передачі сигналів інтелектуальної системи керування транспортним засобом.....	297
Дослідження акустичних навантажень у підобтічковому просторі з урахуванням коефіцієнта заповнення	300
Розробка регулярних структурованих сіток для скінченно-елементного моделювання на прикладі аналізу НДС в прямокутній пластині з отвором	304
Моделювання та застосування інформаційних технологій у проблемах механіки та у матеріалознавстві	308
Дослідження напружено-деформованого стану металоконструкцій порталних кранів.....	311
Вплив розташування та орієнтації еліптичних включень на концентрацію напружень навколо кругового отвору в циліндричній оболонці.....	314
Про концентрацію напружень у тонких пластинах і циліндричних оболонках з квадратним отвором, оточеним включенням із функціонально-градієнтного матеріалу	318
Аналіз впливу нерівномірної геометрії композитної балки на характеристики її власних коливань	321
Особливості вихорової динаміки потоку пилових частинок у газифікаторах	325
Чисельне моделювання вихорової динаміки потоку пилових частинок у газифікаторах.....	329
Математичне моделювання пилового забруднення поверхонь космічних апаратів в об'ємі головного обтічника.....	333
Динаміка сталевих канатів переддетонаційного екрану при поперечному ударі	336
Про моделювання концентрації напружень навколо кругових отворів у тришарових циліндричних елементах ракет	339
Розроблення вибухозахисного контейнера.....	343
Моделювання руйнівних випробувань конструкцій ракетноносіїв на основі уточнених математичних моделей	347
Розвиток методів розрахунку композитних елементів аерокосмічних конструкцій з використанням уточнених теорій пластин і оболонок	350
Розробка програмного забезпечення для інтеграції числового моделювання корпусів окислювальних баків з інтерфейсом користувача	354
Прогнозування деформативних властивостей трансверсально-ізотропних волокнистих матеріалів з розорієнтованими волокнами та нелінійною матрицею	357
Mathematical modelling of stress-strain state in composite stay rope with local fiber breakage	361
Порівняння характеристик «класичного» холловського двигуна і магнітно-екранованого... ..	366
Аналіз роботи холловського двигуна st-40 з використанням криптону та ксенону у якості робочої речовини.....	368
Блочно-параметричний підхід в обернених задачах знаходження геометричних характеристик багатшарових основ	370



Моделювання метаматеріалів для 3d-друку полімерних ливарних моделей та металевих виробів	373
Моделювання напруженого стану металу при знакозмінному деформуванні штаби в згино-розтягуючому пристрої	376
Оцінювання ефективності зміцнення пошкодженого тріщинами бетонного перекриття за ін'єкційними технологіями	380
Моделювання термодинамічних станів матеріалу небезпечних зон конструкцій спеціального призначення	383
Дослідження перспектив використання альтернативних палив у поршневих двигунах гібридних енергоустановок	387
Методика оцінки ефективності сумісної роботи систем пиловловлювання і вентиляції місцевого провітрювання при роботі прохідницького комбайна	391
СЕКЦІЯ 4. ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРЕСИВНИХ ТА НЕТРАДИЦІЙНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА ВИРОБНИЦТВІ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.	395
Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану комбінації циліндричної та конічної оболонок з використанням нейронних мереж	395
Вебреалізація постпроцесора з відкритим початковим кодом	402
Методика оцінки ризиків на основі кореляційного аналізу: інструмент для ефективного управління ризиками малих підприємств	405
Розв'язання прямих та обернених крайових задач адаптивними нейромережевими методами	409
Use of aerospace images for calculation of pursuit problems by methods of corporate differential games	413
Застосування технологій штучного інтелекту для ультразвукової діагностики пошкодженості матеріалів	417
Інформаційна система технічної діагностики матеріалів на основі реєстрації зворотно розсіяного ультразвукового сигналу	420
Використання перехідних процесів для діагностування прокатного обладнання	424
Методи покращення та застосування існуючих технологій обробки зображень в умовах використання в режимі реального часу	427
Про ініціативу «back british metals initiative», аналог якої був би корисним для відновлення металургії та металообробки в Україні	430
СЕКЦІЯ 5. АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНЖЕНЕРНОЇ ОСВІТИ. ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ЕЛЕКТРОННОМУ НАВЧАННІ.	433
Вирішення сучасних проблем вищої інженерної освіти на кафедрі механотроніки дну імені олеся гончара	433
Основні підходи до вирішення сучасних викликів інженерної освіти	438
Застосування програмних продуктів autodesk в інженерній освіті	442
Створення сучасної методики навчання з виконання проєктів	446
Основні тенденції процесу розвитку творчого потенціалу та креативності студентів інженерних спеціальностей	450



**ДО УЧАСНИКІВ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
MPMSPS - 2025****Шановні колеги!**

Від імені Організаційного комітету міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми механіки у конструкціях спеціального призначення» вітаємо Вас на теренах Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Глибока подяка Вам за внесок у вирішення проблем механіки конструкцій спеціального призначення та активну участь у роботі конференції. Результати представлених на конференції досліджень можуть бути основою для генерації нових наукових ідей, перспективних конструкцій і систем, які здатні сприяти розвитку науково-технічного прогресу і стимулювати участь науковців, представників промислових підприємств і організацій у наступних конференціях за даною тематикою.

Сподіваємо, що дана конференція, і в майбутньому буде майданчиком для обміну ідеями, пошуку інженерних рішень, укріплення співпраці між науковими центрами, підприємствами та освітніми установами.

Бажаємо натхнення, плідної співпраці в процесі нових наукових звершень і ефективного відновлення країни.

Організаційний комітет MPMSPS - 2025



ПЛЕНАРНЕ ЗАСІДАННЯ

Marco Amabili¹¹*School of Engineering, Westlake University, Hangzhou, China**marco.amabili@mcgill.ca***NONLINEAR DAMPING IN LARGE-AMPLITUDE VIBRATIONS OF SHELLS AND PLATES**

Abstract. Experiments show a strong nonlinear dependence of damping on the vibration amplitude for plates and shells of different sizes and different materials. A model of nonlinear damping was derived from linear viscoelasticity by introducing geometric nonlinearity. The resulting damping model was nonlinear, and the model parameters were identified from experiments. Applications to biomechanics were also considered.

Keywords: Nonlinear vibrations; damping; plates; shells; biomechanics.

Introduction .An increase in damping is relevant for the passive control of vibrations and noise; therefore, it is very relevant in design. Experimental data shows a strong and nonlinear dependence of damping on the vibration amplitude for beams, plates (see Fig. 1), and shells of different sizes and made of different materials (metal, composite materials, silicone rubber, and graphene) [1, 2]. While the frequency shift of resonances due to stiffness nonlinearity is 10 to 25 % at most for common structural elements, a damping value up to several times larger than the linear one can be obtained for vibrations of thin plates when the vibration amplitude is about twice the thickness. This is a huge change in the damping value! Therefore, the nonlinear nature of damping affects structural vibrations much more than stiffness nonlinearity. Despite this experimental evidence, nonlinear damping has not been sufficiently studied yet.

Materials and Results. A model of nonlinear damping was derived from linear viscoelasticity for single-degree-of-freedom systems [3, 4] and rectangular plates [5] by taking into account geometric nonlinearity. The resulting damping model was nonlinear and the model parameters were identified from experiments. Numerical results for forced vibration responses of different structural elements in large-amplitude (nonlinear) regimes were obtained and successfully compared to experimental results, validating the nonlinear damping model. Then, the identification of dissipation in the case of hyperelastic and viscoelastic materials was introduced and applied to soft biological tissues. Loss factors and damping from cyclic loads



were obtained from hysteresis loops at different force levels and frequencies for human aortic tissue [6, 7].

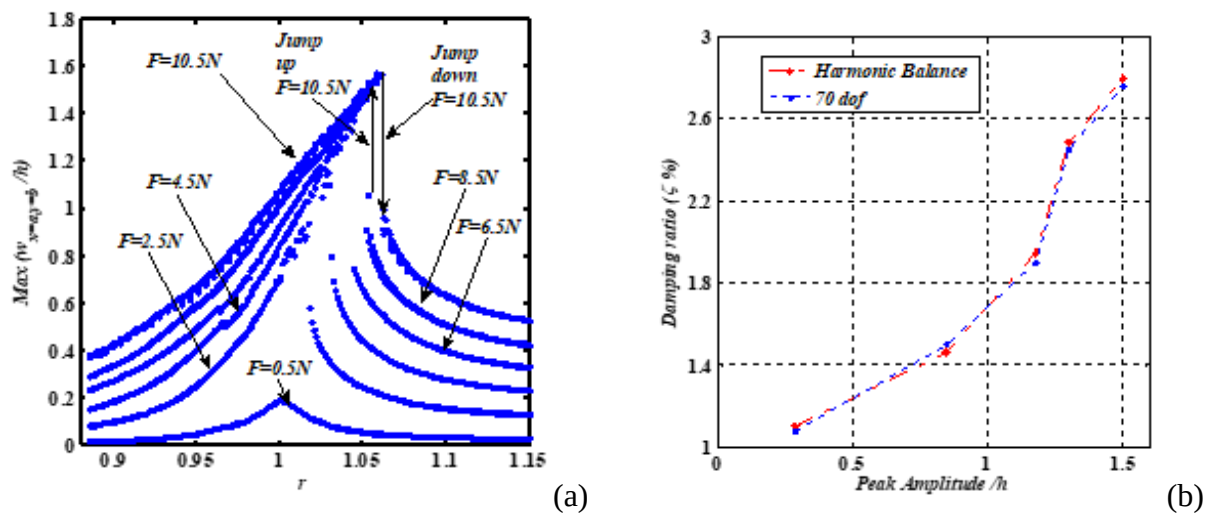


Figure 1: Experimental frequency-response curves of the honeycomb core sandwich plate with free-edges obtained at different force amplitudes and by sweeping the excitation frequency up and down; non-dimensional results. (a) Response curves at different excitations [1]. (b) Damping ratio vs. vibration amplitude at the peak [2].

LIST OF USED SOURCES

1. Alijani, F., Amabili M., Balasubramanian P., Carra S., Ferrari G., Garziera R. (2016) Damping for large-amplitude vibrations of plates and curved panels, part 1: modelling and experiments. *Int. J. Non-lin. Mech.* 85, 23-40.
2. Amabili M., Alijani, F., Delannoy J. (2016) Damping for large-amplitude vibrations of plates and curved panels, part 2: identification and comparison. *Int. J. Non-lin. Mech.* 85, 226-240.
3. Amabili M (2018) Nonlinear damping in large-amplitude vibrations: modelling and experiments. *Nonlinear Dyn.* 93, 5-18.
4. Amabili M (2019) Derivation of nonlinear damping from viscoelasticity in case of nonlinear vibrations. *Nonlinear Dyn.* 97, 1785-1797.
5. Amabili M (2018) Nonlinear damping in nonlinear vibrations of rectangular plates: derivation from viscoelasticity and experimental validation. *J. Mech. Phys. Solids* 118, 275-292.



6. Franchini G., Breslavsky I.D., Holzapfel G.A., Amabili M. (2021) Viscoelastic characterization of human descending thoracic aortas under cyclic load. *Acta Biomaterialia* 130, 291-307.
7. Franchini G., Breslavsky I.D., Giovannello F., Kassab A., Holzapfel G.A., Amabili M. (2022) Role of smooth muscle activation in the static and dynamic mechanical characterization of human aortas. *PNAS* 119, e2117232119.



Веніамін Кубенко¹¹Завідувач відділу, доктор фіз.-мат. наук, професор, Інститут механіки ім..С.П.Тимошенка НАН України, Київ, Україна, e-mail: vdk@inmech.kyiv.ua

НЕСТАЦІОНАРНІ ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ В АКУСТИЧНОМУ ШАРІ – ПЛОСКА І ВІСЕСИМЕТРИЧНА ЗАДАЧІ

Анотація. Побудовано розв'язки задач про дію нестационарного навантаження на поверхні акустичного шару, у плоскому і осесиметричному випадку. Застосовуються методи інтегральних перетворень Лапласа і Фур'є або Ханкеля. Із використанням табличних співвідношень, теорем згортки і апарату узагальнених функцій одержано точні аналітичні вирази для хвильового потенціалу, тиску і швидкості. Проаналізовані особливості хвильових процесів.

Ключові слова: нестационарне навантаження, акустичний шар, хвильові процеси.

Суттєвою відмінність хвильових процесів в шаруватому середовищі від таких, що мають місце у безмежному просторі чи у півпросторі, є наявність багатократно відбитих граничними поверхнями хвиль. Система таких хвиль формує в шарі складне сумарне хвильове поле, яке необхідно дослідити з метою визначення характеристик процесу – тиску і швидкостей як функцій часу і просторових координат. Переважна більшість відомих досліджень поширення і дифракції хвиль в шаруватому середовищі стосується усталених процесів. В даній доповіді на основі методів інтегральних перетворень розвивається підхід до точного розв'язку відповідних граничних задач для скалярного хвильового рівняння, що описує нестационарні процеси в акустичному шарі.

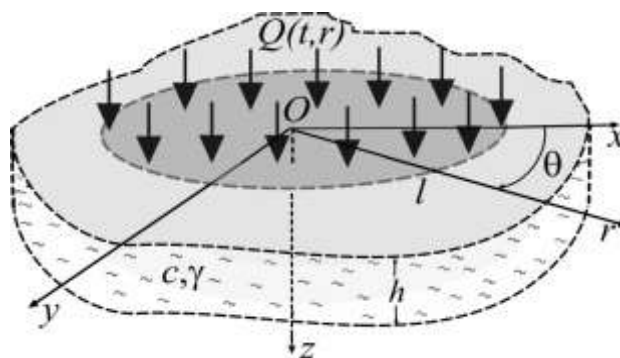


Рис. 1 Схема задачі



Розглядається шар товщини h , фізико-механічні властивості якого задані швидкістю поширення звуку c і густиною γ . У випадку осевої симетрії задачі віднесемо шар до системи циліндричних координат $Or\theta z$ – Рис. 1. На його вільній поверхні в крузі радіуса l задане раптово прикладене нестационарне навантаження

$$Q(t, r) = P_0 H(t) f(r).$$

Тут P_0 – амплітуда, $H(t)$ – одинична функція Хевісайда, $f(r)$ задає розподіл навантаження уздовж радіуса. Протилежна поверхня шару жорстко фіксована.

Дослідження ведеться в безрозмірних позначаннях, розмірними одиницями служать $h, c, \gamma c^2$.

Шукається розв'язок хвильового рівняння стосовно потенціала Φ

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

що пов'язаний із тиском p і швидкістю V співвідношеннями

$$p = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad \vec{V} = \text{grad} \Phi. \quad (2)$$

Хвильовий потенціал має задовольняти вказаним вище граничним умовам на поверхнях шару, умовам на нескінченності і в нулі, та нульовим початковим умовам.

У випадку осевої симетрії застосовуються інтегральні перетворення Лапласа по часу t (з параметром s) і Ханкеля по радіальній координаті r (з параметром ξ).

Задоволення граничних умов дозволяє в просторі зображень отримати наступні вирази для тиску і швидкості:

$$p^{LB} = Q^{LB}(s, \xi) \frac{e^{-z\sqrt{s^2+\xi^2}} + e^{-(2h-z)\sqrt{s^2+\xi^2}}}{1 + e^{-2h\sqrt{s^2+\xi^2}}}. \quad (4)$$

$$V_z^{LB} = Q^{LB}(s, \xi) \frac{\sqrt{s^2+\xi^2}}{s} \frac{e^{-z\sqrt{s^2+\xi^2}} - e^{-(2h-z)\sqrt{s^2+\xi^2}}}{1 + e^{-2h\sqrt{s^2+\xi^2}}}. \quad (5)$$

Тут верхні індекси L і B позначають зображення по Лапласу і Ханкелю відповідно.

Обернення інтегральних перетворень відбувається із застосуванням табличних співвідношень, теорем згортки і апарату узагальнених функцій. Тиск і швидкість шукаються у вигляді рядів по відбитим хвилям: n -й член такого ряду відповідає хвилі, що n раз відбилась від нижньої або верхньої границі. Для випадку, коли навантаження



діє в колі фіксованого радіуса, одержано вираз для тиску в довільній точці шару в довільний момент часу у вигляді суми

$$p(t, r, z) = p_H(t, r, z) + p_\delta(t, r, z), \quad (6)$$

складові якої мають вид

$$p_H(t, r, z) = \frac{P_0}{\pi} \sum_{j=1}^2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n H(t - Z(r, z_{nj})) \int_{X(r)}^{Y(t, r, z_{nj})} \frac{z_{nj}}{(\rho^2 + z_{nj}^2)^{3/2}} \theta^*(r, \rho) \rho d\rho. \quad (7)$$

$$p_\delta(t, r, z) = P_0 \sum_{j=1}^2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n H[t - Z(r, z_{nj})] H\left(\sqrt{z_{nj}^2 + (r+l)^2} - t\right) \frac{z_{nj}}{\pi t} \theta^*\left(r, \sqrt{t^2 - z_{nj}^2}\right). \quad (8)$$

$$Y(t, r, z_{nj}) = \min\left(r+l; \sqrt{t^2 - z_{nj}^2}\right); \quad X(r) = \max(0; r-l);$$

$$z_{n1} = 2nh + z; \quad z_{n2} = 2(n+1)h - z; \quad Z(r, z_{nj}) = \sqrt{[X(r)]^2 + z_{nj}^2}.$$

$$\theta^*(r, \rho) = \begin{cases} \arccos \frac{\rho^2 + (r^2 - l^2)}{2r\rho}, & \left| \frac{\rho^2 + (r^2 - l^2)}{2r\rho} \right| \leq 1, \\ \pi, & \frac{\rho^2 + (r^2 - l^2)}{2r\rho} < -1. \end{cases}$$

Співвідношення (6) – (8) є шуканий точний розв’язок сформульованої задачі.

Аналогічно обчислюється швидкість V_z .

Має місце наступна фізична картина процесу, що розглядається. Збуджена в крузі $r=l$ первинна плоска хвиля рухається в межах циліндричного об’єму $r < l, z > 0$. Одночасно на контурі $r=l, z=0$ виникає хвиля розрідження, що має тороїдальний фронт. Вказана хвиля є розбіжною у області $r > l, z > 0$ і одночасно збігається до осі симетрії. Досягнувши осі, вона відбивається і породжує вторинну (відбиту) хвилю розрідження. Система вказаних хвиль рухається уздовж осі до протилежної границі, при взаємодії з якою породжує відбиті хвилі, що рухаються в зворотному напрямі. Процес послідовних відбиттів за відсутності енергетичних втрат продовжується без обмежень. Отриманий розв’язок дозволяє, утримуючи в рядах (7), (8) відповідну скінчену кількість членів, обчислити шукану характеристику хвильового поля на бажаному відрізку часу.

Формули (6) – (8) програмуються і обчислення виконуються за допомогою складеної програми в системі комп’ютерної алгебри. В доповіді представлені результати обчислень розподілу тиску і швидкостей за часовою і просторовими змінними у вигляді



графічних зображень і шляхом візуалізації розвитку фізичних характеристик з часом у відповідних відеоматеріалах.

Аналогічна за постановкою плоска задача про дію нестационарного навантаження на поверхні півплощини розв'язана із застосуванням інтегральних перетворень Лапласа і Фур'є. Розв'язок цієї задачі також одержаний у вигляді ряду по відбитим хвилям. Результати обчислень наведені в доповіді.



Роман Кушнір¹, Юрій Токовий²

¹директор, академік НАН України, доктор фізико-математичних наук,
професор, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С.

Підстригача НАН України, м. Львів, Україна, e-mail: dyrector@iapmm.lviv.ua

² заступник директора з наукової роботи, член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут
прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, м.
Львів, Україна, e-mail: tokovyy@iapmm.lviv.ua

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНЬ У ПРУЖНИХ БАГАТОШАРОВИХ ТІЛАХ

Анотація. Наведено огляд моделей та методів опису термопружної поведінки багатошарових тіл. Простежено переваги та недоліки моделей таких тіл з точки зору поділу за шарами, та на основі концепції єдиного тіла з кусково-змінними властивостями. Окремо висвітлено результати, отримані з використанням методу безпосереднього інтегрування стосовно побудови аналітичних розв'язків такого класу задач.

Ключові слова. неоднорідні тіла, багатошарові структури, аналітичні розв'язки, задачі термопружності.

Постійний розвиток техніки, інженерії та технологій щораз підвищує вимоги до експлуатаційних параметрів елементів машин, конструкцій і механізмів для забезпечення їхньої безперебійної роботи та мінімізації ризику відмов за інтенсивних силових і теплових навантажень в агресивних середовищах. Відповідність таким вимогам є особливо важливою у виробництві авіаційної та космічної техніки, підводних установок, систем ядерної енергетики, хімічній промисловості, приладобудуванні тощо. Разом із суттєвим поступом у матеріалознавстві це спричинило потужний поштовх до розробки нових технологій, спрямованих на створення композиційних матеріалів із покращеними механічними та теплофізичними властивостями. У багатьох практичних випадках композиційний матеріал формується шляхом періодичного розташування певного структурного елемента, утвореного чергуванням шарів. Шаруваті композитні матеріали також часто використовують для створення захисних покриттів різноцільового призначення. При цьому виникає проблема контрастності теплофізичних,



механічних та геометричних характеристик шарів, що зазвичай супроводжується небажаними ефектами на поверхнях їх розмежування, зокрема, виникненням залишкових напружень, які можуть призвести до утворення тріщин, а також повної або часткової деламінації. Для зменшення впливу таких ефектів використовують функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ) – особливий клас неоднорідних композитних матеріалів, властивості яких плавно змінюються на макрорівні в одному або кількох просторових напрямках, зазвичай від однієї поверхні до іншої. Типовий ФГМ складається з шарів з різними механічними властивостями: металокерамічні, металокерамічні-металеві тощо. Ключова перевага ФГМ полягає у використанні контрастних властивостей їх складових матеріалів: кераміка забезпечує високу термічну та корозійну стійкість, а метали – високу механічну міцність та зносостійкість.

Моделювання профілів зміни властивостей ФГМ на макроскопічному рівні зазвичай реалізується неперервною або ступінчастою градацією. Моделі, що відповідають першому випадку, припускають, що характеристична лінійна розмірність шарів є достатньо малою для застосування процедури гомогенізації. Ці процедури вводять специфічні параметри, які описують варіації властивостей і усереднені функції стану, що визначають, наприклад, температурне поле або напружено-деформований стан розглядуваного структурного елемента. Такі підходи здебільшого враховують об'ємні частки шарів, однак не дають змогу врахувати особливості механічних властивостей матеріалів. Тому вони виявляються ефективними, коли усереднені властивості ФГМ можна вважати ізотропними на макрорівні. Однак, зазвичай шарувата структура природно призводить хоча б до трансверсально ізотропних властивостей, що вимагає більш складних процедур гомогенізації. У випадку ж ступінчатої градації геометричні властивості шарів є такими, що використання гомогенізаційних процедур призводить до суттєвих відхилень при визначенні термонапруженого стану таких структур.

Зазначені два класи неоднорідних структур створюють передумови їх вивчення на основі двох принципово відмінних підходів. Одним з них є розгляд багатшарових структур з позицій «пошарового» аналізу – коли задачі формують та розв'язують у кожному шарі з достатньою кількістю ступенів вільності для задоволення умов контакту шарів та межових умов. Інший підхід базується на розгляді шаруватого тіла як єдиного цілого з кусково-змінними властивостями.

У доповіді проаналізовано окремі напрацювання у реалізації обох цих підходів. Окрему увагу звернуто на результати, отримані з використанням удосконаленого алгоритму [1] методу безпосереднього інтегрування [2, 3], який поширено на випадок



багатошарових тіл з довільною залежністю пружних та теплофізичних властивостей матеріалу кожного шару від товщинної координати.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tokovyy, Y. (2024). Elastic and thermoelastic response of multilayer inhomogeneous hollow cylinders. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **31**(17), 3889–3901.
2. Kushnir, R. M., Yasinsky, A.V., & Tokovyy, Y.V. (2022). Effect of Material Properties in the Direct and Inverse Thermomechanical Analyses of Multilayer Functionally Graded Solids, *Advanced Engineering Materials*, 24, 2100875.
3. Tokovyy, Y. & Ma, C.-C. (2021). *The Direct Integration Method for Elastic Analysis of Nonhomogeneous Solids*. Newcastle, Cambridge Scholars Publishing.



Natalia Smetankina¹, Serhii Morhun²

¹*Head of Department of Vibration and Thermostability Studies, Dr. Sc., Professor, Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, nsmetankina@ukr.net*

²*Associate Professor, PhD, Associate Professor, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, serhii.morhun@nuos.edu.ua*

SINGLE SHAFT GAS TURBINE ENGINE ROTOR DYNAMIC STRESSES DETERMINATION

Abstract. The problem of the gas turbine rotor dynamic stresses determination has been studied. The developed mathematical model takes into account the curvilinear finite elements of hexagonal type. The turbine rotor dynamic stresses fields were found for several most dangerous forced vibration modes and proved experimentally.

Key words: gas turbine rotor, dynamic stresses, forced vibration.

Introduction. For the different types of modern ground or even floating power plants, it is rather necessary to increase the engine's capacity along with the high level of engine's durability and reliability. To achieve these goals, the researchers are forced to solve a number of problems in different areas, such as fluid flow dynamics, heat transfer, mechanics of solid deformable body etc. Furthermore, all of these problems are closely interconnected and the appropriate mathematical models should be designed to take into account all the aspects of the gas turbine rotor working process.

Problem Solution and Results. As the stationary coordinate system, the Cartesian right-handed xyz coordinate system with the center at point O is taken (Fig. 1). This coordinate system rotates together with the turbine rotor at a constant angular velocity Ω equal to the angular velocity of rotor.

According to the generalized Hooke's law [1] the solid body stress-strain state can be described by the next matrix dependence:

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_T\}),$$

where $\{\sigma\}$ is stress matrix-vector; $\{\varepsilon\}$ is elasticity deformation vector; $\{\varepsilon_T\}$ is thermal elasticity vector; $[D]$ is elasticity matrix of the turbine rotor material.



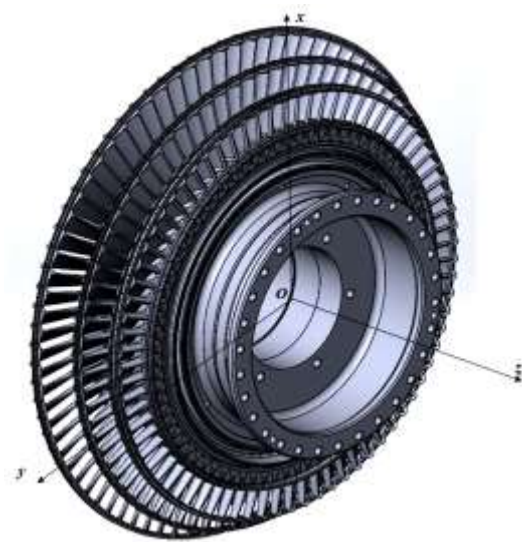


Figure 1 – The 3D model of the gas turbine rotor as a solid body

The power of the investigated gas turbine is 25 MW. The gas temperature at the entrance to the turbine rotor is 1583 K; total pressure at the stage inlet 0.7578 MPa; rotor speed 9390 rev/min.

As it is obvious the increase of the turbine rotor dynamic stresses is caused by the growth of the rotor forced vibration frequency [2]. The most dangerous are the low vibration frequencies, because they can cause the resonance state with the rotor rotation frequency. Thus, it is obligatory to obtain the distribution of dynamic stresses for the first four harmonic indexes. The results of such calculations in comparison with experimental data [3] are given below in Table 1.

Table 1 – Maximum dynamic stresses in the blades of the first rotor impeller

Forced vibration mode harmonic index, k	Forced vibration frequency f , Hz	Maximum dynamic stresses $\sigma_{\max}$, MPa		Divergence, %
		Numerical data	Experimental data	
1	868,27	397,53	373,21	6,2
2	1876,70	431,71	419,90	2,6
3	2090,82	481,96	455,9	5,4
4	3175,40	514,20	489,8	4,9

Conclusion. The study of the modern gas turbine engine rotor stress-strain state has been held. For this problem a refined mathematical model using the curvilinear hexagonal finite elements with eight nodes was developed. The level of the rotor dynamic stresses and its forced



vibration frequencies for different harmonic indexes are connected directly proportional. The main factors of such dynamic stresses fields are the non-stationary gas flow, causing the irregular pressure field and heat exchange on the rotor surfaces. gas flow pressure. The sharp temperature gradient between the peripheral part of the blade, its root part and the disk is also should be taken into account. Such negative factors with the high level of dynamic stresses demand the new studies of the turbine rotor creep and fatigue strength.

REFERENCES

1. Narasimbachary, S. B., Smith, K., Schinde, R. S., Amann, C., Kadau, K., & Iyer, S. (2019). Life assessment of large turbine blades. In *ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition Proceeding Paper*. <https://doi.org/10.1115/GT2019-91630>
2. Morhun, S. (2024). Determination of the modern single shaft gas turbine rotor thermal stresses. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, (54), 46–60. <https://doi.org/10.55787/jtams.24.54.1.046>
3. Smetankina, N., & Morhun, S. (2024). The modern single shaft gas turbine rotor stress-strain state determination taking into account the contact thermoelasticity problem, *Technicki vjesnik*, 31(2), 551–556. <https://doi.org/10.17559/TV-20230628000770>



Грищак В.З.

*професор кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, д.т.н.,
професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро,
Україна, e-mail: hryshchak.v.z@nmu.one*

ГІБРИДНИЙ АСИМПТОТИКО-ЧИСЕЛЬНИЙ ПІДХІД ДО РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧ МЕХАНІКИ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Анотація. Доповідь присвячена наближеним аналітико-чисельним розв'язкам задач механіки конструкцій із змінними за координатами та часом параметрами, які зводяться до лінійних і нелінійних сингулярних диференціальних рівнянь та їх систем з параметрами при старшій похідній і нелінійній складовій, на базі асимптотичних методів збурення і фазних інтегралів. Застосування базисних функцій за вказаними методами до принципу ортогоналізації за Гальоркіним у гібридному підході із застосуванням комп'ютерної алгебри дозволяють отримати наближені аналітичні розв'язки, які тісно пов'язані із фізичною суттю досліджуваних задач, а також можливістю аналізу чисельних результатів за величиною параметра сингулярності асимптотичного представлення шуканих функцій. Надається аналітичний огляд і обговорюються результати застосування вказаного підходу до розв'язку ряду задач механіки, пов'язаних з математичними моделями стійкості і динаміки конструкцій цільового призначення.

Ключові слова: гібридний асимптотико-чисельний підхід, методи збурення і фазних інтегралів, принцип ортогоналізації за Гальоркіним, механіка конструкцій із змінними параметрами, нелінійна динаміка, стійкість, конструкції із змінними параметрами.

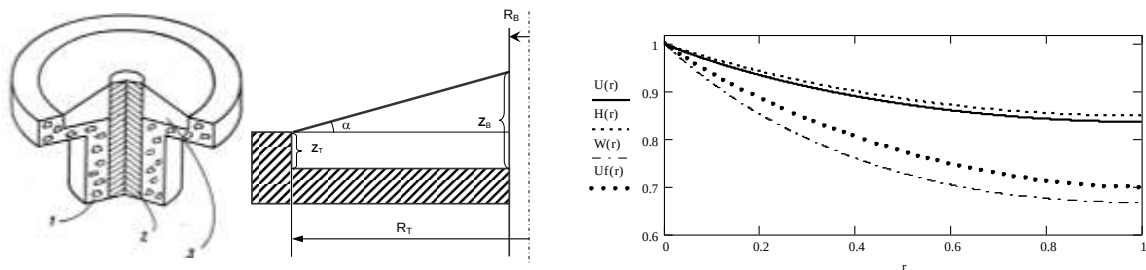
Вступ. Ідея поєднання асимптотичних методів з чисельними покладена в основу гібридного асимптотико-чисельного підходу до розв'язку задач несучої здатності конструкцій і споріднених напрямків механіки. Спираючись на сучасні досягнення аналітичних, зокрема асимптотичних, і чисельних методів аналізу на базі комп'ютерної алгебри та існуючих програмних комплексів відкривається можливість нелокального дослідження з формуванням представлення про особливості поведінки конструкцій різного цільового призначення з візуалізацією досліджуваних процесів.



На основі запропонованого гібридного асимптотичного підходу (1995-2024) обговорюються результати розв'язку ряду задач механіки конструкцій із змінними параметрами.

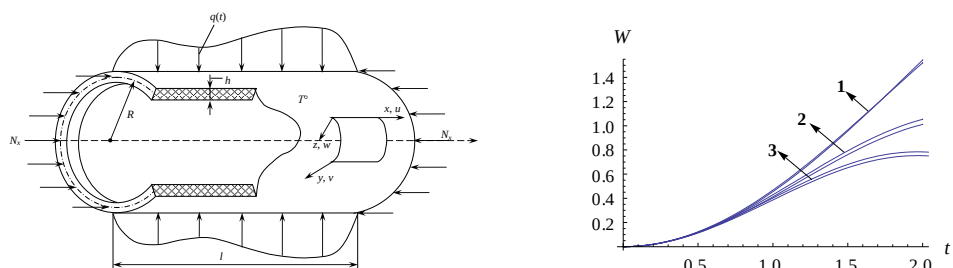
Побудова та дослідження математичних моделей тепловипромінюючих систем неоднорідної структури (2009).

Досліджуються характер тепловипромінювання радіаторів, які є найбільш важкими елементами системи терморегулювання, зокрема космічного апарату, і потребують створення раціональних конструкцій з точки зору відводу тепла випромінюванням з мінімізацією вагових характеристик. Розв'язується задача про тепловипромінювання кільцевих пластин радіатора трапецеїдального та прямокутного перетинів.



За умови застосування введених припущень задача зводиться до необхідності інтегрування сингулярного диференціального рівняння другого порядку із змінними коефіцієнтами і нелінійною складовою четвертого ступеня при заданих граничних умовах. Надається зіставлення наближених аналітичних розв'язків за гібридним підходом, прямим чисельним інтегруванням основного рівняння задачі при фіксованому параметрі нелінійності та іншими методами аналізу. Показано, що гібридний асимптотико-чисельний підхід дає задовільний результат як для «малих», так і «великих» значень параметра сингулярності (при старшій похідній) розв'язувального рівняння, а також при нелінійній складовій.

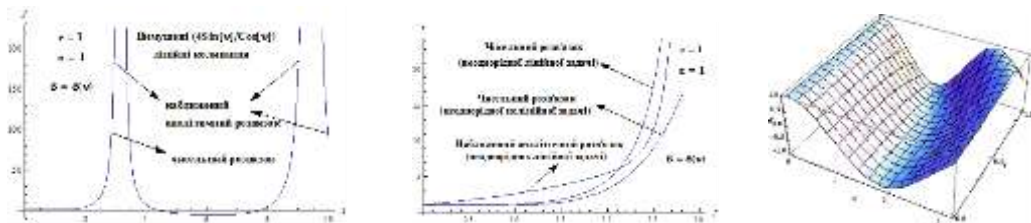
Деформування циліндричної оболонки із композиційного матеріалу із змінними за часом маси та зовнішнього тиску при комбінованому термосиловому динамічному навантаженні (2011).



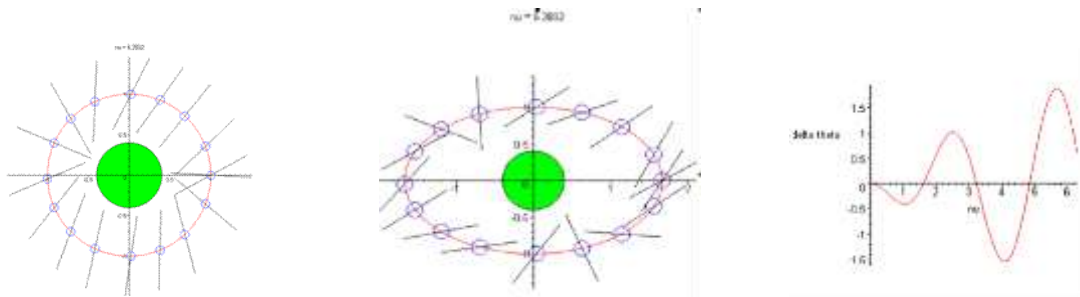
Отримано наближені аналітичні залежності для функції прогину оболонки в залежності від жорсткісних параметрів оболонки, статичного осьового зусилля і зовнішнього динамічного навантаження, залежного від часу та температури. Результати обчислень за запропонованим наближеним аналітичним підходом співставленні з прямим чисельним розв'язком задачі із застосуванням програмного комплексу «Mathematica» для заданих параметрів досліджуваної системи.

Нелінійна динаміка супутника в площині еліптичної орбіти із застосуванням гібридного асимптотичного підходу (2013).

Задача розв'язується у припущенні, що супутник знаходиться у центральному гравітаційному полі таким чином, що його центр мас рухається у площині еліптичної орбіти, і основне нелінійне диференціальне рівняння проблеми є неоднорідним рівнянням із змінними коефіцієнтами відносно функції подвійного кута між радіусом-вектором центру мас і віссю інерції.



Надається порівняння аналітичних за даним підходом і чисельних розв'язків відповідно до лінійних і нелінійних вимушених коливань моделі руху супутника в площині еліптичної орбіти та вплив параметру ексцентриситету орбіти.

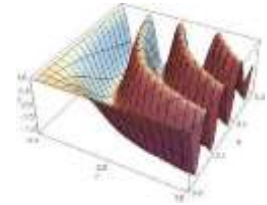
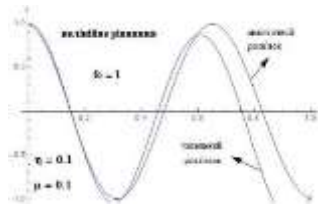
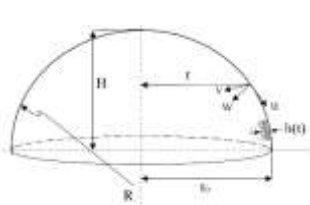


Візуалізація нелінійного динамічного процесу в площині кругової і еліптичної орбіт, а також залежність різниці у кутах осі супутника за часом представляються згідно програми обчислень, реалізованої у кодах системи комп'ютерної алгебри «Matlab», яка формує анімацію руху супутника відповідно до заданого кута обертання.

Вплив характеристик функціонально-градієнтних матеріалів на нелінійну динаміку оболонкових конструкцій в умовах температурного середовища (2016).



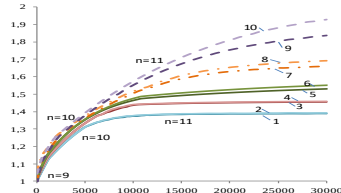
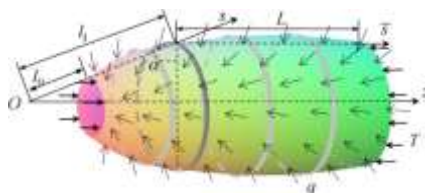
На базі теорії Кармана розв'язується задача про нелінійні коливання недосконалих сферичних пологих оболонок з функціонально градієнтного матеріалу (ФГМ), властивості якого змінюються по товщині відповідно до степеневому закону, при зовнішньому температурному навантаженні.



Аналізується характер динамічного процесу недосконалої оболонки змінної за часом товщини, а також при наявності локалізованого збурення (2024).

Застосування методу початкових параметрів у матричній формі та гібридного асимптотичного підходу стосовно стійкості складених оболонкових конструкцій типу «циліндр-конус» при комбінованому статичному навантаженні (2020-2024).

Особливу увагу приділено вибору геометричних і жорсткісних параметрів силових елементів конструкції, які забезпечують раціональні характеристики досліджуваної системи з точки зору локальних і загальних форм випинання, що дало можливість дослідити вплив знаку Гаусової кривини серединної поверхні відсіків на характер закритичних деформацій і несучу здатність складених оболонкових систем.



Застосований алгоритм візуалізації форм біфуркації підкріплених конструкцій дозволив зробити висновок про їх раціональні характеристики з виявленням потенційно небезпечних зон руйнування.

Висновок. Запропонований підхід розширює діапазон гібридних асимптотичних методів, у тому числі із застосуванням асимптотико-варіаційних (2003), і сучасних комп'ютерних технологій у вирішенні проблем математичного моделювання задач механіки у конструкціях цільового призначення, зокрема у проблемах кореляційного аналізу стохастичної поведінки нелінійних механічних систем із змінними за часом параметрами (2002), контролю динамічної нестійкості п'єзоконструкцій (2006-2008),



несучої здатності багатошарових складених оболонкових систем (2020-2023), нелінійних проблемах зовнішньої балістики (2022-2024), а також у суміжних галузях механіки.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gristchak V., Dmitrieva Ye. (1995) Hybrid WKB-Galerkin Method and its Application. *Technische Mechanik*, 15 (4), 281-294.
2. Грищак В. З., Дмитрієва О.М. (1999) Застосування гібридного ВКБ-Гальоркін методу до розв'язання деяких крайових задач механіки *Доп. НАН України*, (4), 63-67.
3. Грищак В. З. (2009) *Гібридні асимптотичні методи та техніка їх застосування* Запорізький національний університет.
4. Грищак В.З., Д'яченко Н.М., Бабуров В.В.(2022) Вплив Гаусової кривини серединної поверхні складеної оболонки на локальне та загальне випинання при комбінованому навантаженні. *Космічна наука і технологія*, 28 (4), 31-38.



Марчук Михайло¹, Клименко Дмитро²,

Сіренко Володимир³, Харченко Володимир⁴

¹завідувач відділу, доктор фіз.-мат. наук, професор, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів, Україна, e-mail:

mv_marchuk@ukr.net

²начальник відділу, канд. техн. наук, Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: klymenko_dv@hotmail.com

³начальник комплексу, канд. техн. наук, старший наук. співроб., Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail:

v.n.sirenko@i.ua

⁴провідний фахівець, Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: volodymyrmx@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ НАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Анотація. Розглянуті характерні властивості та особливості запропонованих математичних і комп'ютерних моделей механічної поведінки навантажених елементів конструкцій ракетно-космічної техніки для більш повного врахування реальних експлуатаційних умов у порівнянні з існуючими. Наведені приклади застосування запропонованих моделей при проектних розробках серійних та перспективних новітніх зразків ракетно-космічної техніки.

Ключові слова: ракетно-космічна техніка, навантаження, міцність, математична модель, комп'ютерна модель, неруйнівний експеримент.

Вступ. Підвищена напруженість тонкостінних та об'ємних елементів конструкцій сучасної ракетно-космічної техніки (РКТ) зумовлює використання найбільш досконалих математичних і розрахункових моделей, в яких по можливості необхідно достатньо повно відобразити реальні умови експлуатації конструкції та механічні властивості матеріалів. Тому крім традиційної властивості пружності матеріалу в розрахунках елементів конструкцій РКТ все більшого значення набувають його пластичні властивості. Особливо актуальним це питання постає при проектуванні елементів конструкцій рідинних двигунів РКТ, де протиріччя між вимогами міцності та мінімальної матеріаломісткості проявляється найбільш гостро. Прикладом може бути



випадок, коли ставиться завдання визначення допустимого (руйнівного) навантаження, при якому матеріал значної частини вказаних об'єктів перебуває в пружно-пластичному стані. Такий стан матеріалу, що не зумовлює порушення функціонального призначення конструкції та роботи її обладнання, допускається в деяких елементах конструкцій РКТ одноразового використання, а також при тривалому експлуатаційному навантаженні.

Характеристики математичних моделей конструкцій РКТ.

Створення конструкцій ракетно-космічної техніки (РКТ), що найбільш повно відповідають умовам експлуатації, вимогам надійності, а також оптимальності у ваговому співвідношенні, зумовлює як розробку нових матеріалів, методів проектування і розрахунку, так і необхідність вдосконалення як існуючих і вже використовуваних, так і розроблення нових, більш точних їхніх математичних моделей [2, 4, 5].

Придатність математичної моделі для розв'язування задач дослідження характеризується тим, якою мірою вона володіє так званими цільовими властивостями, основними з яких є адекватність, стійкість і чутливість [1].

У загальному випадку під адекватністю розуміють ступінь відповідності моделі тому реальному явищу або об'єкту, для опису якого вона будується. Разом з тим, створювана модель орієнтована, як правило, на дослідження певного підмножини властивостей цього об'єкта. Тому можна вважати, що адекватність моделі визначається ступенем її відповідності не стільки реальному об'єкту, скільки меті дослідження.

При перевірці адекватності моделі як існуючої, так і проєктованої системи реально може бути використано лише обмежена підмножина всіх можливих значень вхідних параметрів. У зв'язку з цим для обґрунтування достовірності отриманих результатів моделювання велике значення має перевірка стійкості моделі. В теорії моделювання [1] це поняття трактується як здатність моделі зберігати адекватність при дослідженні ефективності системи на всьому можливому діапазоні робочого навантаження, а також при внесенні змін в конфігурацію системи.

Якщо зміна вхідних впливів або параметрів моделі (в деякому заданому діапазоні) не відображається на значеннях вихідних параметрів, то виникає потреба в оцінюванні чутливості моделі до зміни параметрів робочого навантаження і внутрішніх параметрів досліджуваного об'єкта. Таку оцінку проводять по кожному параметру моделі окремо. Базується вона на тому, що зазвичай діапазон можливих змін параметра відомий. Дані, отримані при оцінці чутливості моделі, можуть бути використані при плануванні експериментів: корегуються ті параметри, за якими модель є найбільш чутливою.



Комп'ютерне моделювання. Комп'ютерне моделювання – це процес відтворення поведінки об'єкта за допомогою комп'ютерної програми, що реалізує подання об'єкта у формі математичної моделі. Така програма називається комп'ютерною моделлю [1].

Результат комп'ютерного моделювання полягає в отриманні кількісних і якісних висновків щодо наявної моделі. Якісні висновки дають змогу виявити не відомі раніше властивості об'єкта: його структуру, динаміку розвитку, стійкість, цілісність та ін. Кількісні висновки в основному носять характер прогнозу деяких майбутніх або пояснення минулих значень змінних, що характеризують систему. За допомогою комп'ютерного моделювання вивчаються об'єкти, які неможливо, дорого або небезпечно відтворювати в реальних умовах. Це дає змогу не лише зекономити матеріальні ресурси, а й дотримуватися екологічних умов, уникати можливих шкідливих або руйнівних наслідків проведення випробувань. Комп'ютерне моделювання дозволяє візуалізувати об'єкти будь-якої природи, здійснювати багаторазові випробування їхніх моделей, кожного разу повертаючи їх в початковий стан; отримувати різні характеристики об'єкта в числовому або графічному вигляді; знаходити оптимальну конструкцію об'єкта, не виготовляючи його пробних екземплярів. Воно полягає в проведенні серії числових експериментів на комп'ютері, метою яких є аналіз та інтерпретація; зіставлення результатів моделювання з реальною поведінкою досліджуваного об'єкта; за необхідності, подальше уточнення моделі. Кінцева мета комп'ютерного моделювання – ухвалення рішення на основі всебічного аналізу його результатів. Основою вироблення рішення є результати тестування й експериментів. Якщо результати не відповідають цілям поставленого завдання, це значить, що допущено помилки на попередніх етапах. Якщо такі помилки виявлено, то потрібне коригування моделі, тобто повернення до одного з попередніх етапів. Процес повторюється доти, поки результати експерименту не відповідатимуть цілям моделювання.

Слід зазначити, що метод комп'ютерного моделювання є чисельним методом, і тому, як будь-який чисельний метод, він має істотний недолік – його результати завжди носять частковий характер, котрі відповідають певним значенням параметрів об'єкта. Для його аналізу необхідно багаторазово моделювати процес його функціонування, варіюючи вхідні дані моделі.

Приклади застосування та висновки. Вище наведені принципи математичного та комп'ютерного моделювання були застосовані авторами та їх співробітниками до



розв'язання низки важливих науково-технічних проблем при вдосконаленні існуючих і проектуванні нових перспективних зразків РКТ. Розроблено методику розрахунку корпусів твердопаливних двигунів типу «кокон» із багатошарових композитів за комплексної дії навантажень з урахуванням нагріву та стику з суміжними відсіками. Створено методики розрахунку міцності деталей сопел в таких двигунах за інтенсивного термосилового навантаження та оболонкових конструкцій із шаруватих композитів з гіперпружними складниками. Розроблені основи та створена методологія оцінки механічного стану та визначення фактичних руйнівних навантажень оболонкових конструкцій за результатами моделювання та неруйнівних експериментальних випробувань [3, 5]. Все це має значний вплив на швидкість і якість проєктних розробок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кононюк, А. Ю. (2012). *Узагальнена теорія моделювання. Основи*. Освіта України.
2. Marchuk, M., Khomyak, M. (2024). *New Structural Approach for Determination of Effective Thermoelastic Modules of Discrete Composite Layers* / In: H. Altenbach, V. Bogdanov, A. Grigorenko, R. Kushnir, V. Nazarenko, V. Eremeyev (eds). *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods. Advanced Structured Materials*, Springer Nature.
3. Дробенко, Б.Д., Марчук, М.В. (2023). Розрахункове моделювання руйнівних випробувань ракетних конструкцій. *Мат. методи та фіз.-мех. поля*, (66, № 3–4), 169–179 с.
4. Марчук, М.В., Пакош, В.С., Харченко, В.М., Хом'як, М.М. (2022). Ефективні термопружні модулі дискретних композиційних шарів у межах моделі ортотропного матеріалу. *Мат. методи та фіз.-мех. поля*, (65, № 3-4), С. 111–122.
5. Drobenko, B.D., Kushnir, R.M., and Marchuk, M.V. (2021) Methodology for Exploration of the Strength and Determination of Destructive Load of Rocket and Space Engineering Constructions. *Sci. innov.*, (17, no. 3), P. 28–36.



Кирилюк Віталій Семенович¹, Левчук Ольга Іванівна²

¹провідний науковий співробітник, д.ф.-м.н., с.н.с., Інститут механіки ім. С.П.

Тимошенка, Київ, Україна, kirilyuk_v@ukr.net, kirilyuk6131@gmail.com

²старший науковий співробітник, к.ф.-м.н., с.н.с., Інститут механіки ім. С.П.

Тимошенка, Київ, Україна, e-mail: 2013levchuk@gmail.com

КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ТІЛ З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ НЕОДНОРІДНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ, ФРИКЦІЙНОГО ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ, ДЕФЕКТІВ НА ГРАНИЦІ ПОДІЛУ

Анотація. Представлені результати досліджень тривимірних контактних задач електропружності для п'єзоелектричного трансверсально-ізотропного матеріалу. Встановлено вплив на контактну взаємодію неоднорідного розподілу температурного поля, фрикційного тепловиділення при терті ковзання, досліджено контактну взаємодію електропружних тіл при стисканні за наявності приповерхневих виїмок чи жорстких включень на границі поділу матеріалів.

Ключові слова: контактна взаємодія, електропружний півпростір, жорсткий штамп, розподіл температури, фрикційне тепловиділення, приповерхнева виїмка, жорсткі включення, контактні напруження.

Вступ. При створенні елементів вимірювальних приладів і систем (датчиків) та перетворювачів енергії широко застосовуються п'єзоелектричні матеріали, що стимулює проведення аналізу розподілу напружень у електропружних тілах. Але проведення таких досліджень ускладнюється тим, що система рівнянь електропружності враховує зв'язаність силових і електричних полів, і має суттєво більш складну структуру, ніж система рівнянь теорії пружності.

$$\begin{aligned} c_{11}^E u_{x,xx} + \frac{1}{2} (c_{11}^E - c_{12}^E) u_{x,yy} + c_{44}^E u_{x,zz} + \frac{1}{2} (c_{11}^E + c_{12}^E) u_{y,xy} + (c_{13}^E + c_{44}^E) u_{z,xz} + \\ + (e_{31} + e_{15}) \Psi_{,xz} = \lambda_{11} T_{,x}, \\ c_{11}^E u_{y,yy} + \frac{1}{2} (c_{11}^E - c_{12}^E) u_{y,xx} + c_{44}^E u_{y,zz} + \frac{1}{2} (c_{11}^E + c_{12}^E) u_{x,xy} + (c_{13}^E + c_{44}^E) u_{z,yz} + \\ + (e_{31} + e_{15}) \Psi_{,yz} = \lambda_{11} T_{,y}, \\ (c_{13}^E + c_{44}^E) (u_{x,xz} + u_{y,yz}) + c_{44}^E (u_{z,xx} + u_{z,yy}) + c_{33}^E u_{z,zz} + \\ + e_{15} (\Psi_{,xx} + \Psi_{,yy}) + e_{33} \Psi_{,zz} = \lambda_{33} T_{,z}, \\ (e_{31} + e_{15}) (u_{x,xz} + u_{y,yz}) + e_{15} (u_{z,xx} + u_{z,yy}) + e_{33} u_{z,zz} - \varepsilon_{11}^S (\Psi_{,xx} + \Psi_{,yy}) - \varepsilon_{33}^S \Psi_{,zz} = -p_3 T_{,z}. \end{aligned}$$



$$T_{,11} + T_{,22} + (k_{33} / k_{11}) T_{,33} = 0 ;$$

Представлення розв'язків системи рівнянь через потенціальні функції

$$\Phi_{j,xx} + \Phi_{j,yy} + \nu_j \Phi_{j,zz} = 0 \quad (j=1, 2, 3, 4)$$

Неоднорідний розподіл температурного поля в області контакту.

$$u_z(x, y, 0) = \delta - \beta_y x + \beta_x y - \varphi(x, y) = \frac{1}{2\pi} B_1^{Piezo} \iint_{\Omega} \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}},$$

$$\sigma_{zz}|_{z=0} = -p(x, y) - \gamma_S^{Piezo} T_0(x, y)$$

Значення B_1^{Piezo} і γ_S^{Piezo} – різні для електродованих і неелектродованих поверхонь.

Плоский еліптичний штамп

$$p(x, y) = \frac{P - Q_1}{2\pi ab} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right)^{-1/2} + \gamma_1^{Piezo} T_0(x, y) \quad \delta = \frac{P - Q_1}{2\pi a} B_1^{Piezo} K(e)$$

$$P \geq Q_1 = \gamma_1^{Piezo} \iint_{\Omega} T_0(x, y) dx dy$$

Неплоский еліптичний штамп

$$p(x, y) = \frac{3}{2} \frac{P - Q_3}{\pi ab} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}},$$

$$\frac{2\pi}{B_1^{Piezo}} \left(\delta - \frac{x^2}{2R_1} - \frac{y^2}{2R_2} \right) = \frac{3}{2a} \frac{P - Q_3}{2a} \left[K(e) - \frac{x^2}{a^2} D(e) - \frac{y^2}{a^2} \frac{B(e)}{1-e^2} \right]$$

Фрикційне тепловиділення при терті ковзання.

$$k_{33}^{(1)} \frac{\partial T_1}{\partial z_1^{(1)}} + k_{33}^{(2)} \frac{\partial T_2}{\partial z_2^{(2)}} = -\frac{\nu f p}{J}, \quad T_1 = T_2 \text{ при } (x, y) \in \Omega;$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial z_1^{(1)}} = \frac{\partial T_2}{\partial z_2^{(2)}} = 0 \text{ при } (x, y) \notin \Omega.$$

Маємо

$$T_i(x, y, z_4^i) = \frac{\nu f}{2\pi \left(\frac{\lambda_{33}^{(1)}}{\sqrt{n_4^{(1)}}} + \frac{\lambda_{33}^{(2)}}{\sqrt{n_4^{(2)}}} \right) J} \iint_{\Omega} \frac{p(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z_4^i)^2}};$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{(K(e) - E(e)) - \gamma^* a e (1 - e^2)}{(E(e) / (1 - e) - K(e)) - \gamma^* a e}, \quad e = \frac{2}{3} \frac{e^2}{(2 - e^2) \sqrt{1 - e^2}};$$

$$a = \left[P (A_1^{Piezo} + A_2^{Piezo})^{1/3} \right] \alpha_a; \quad p(x, y) = \frac{3}{2} \frac{P - Q_3}{\pi ab} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}};$$



$$\alpha_a = \left\{ \frac{3}{2\pi} \left[\frac{1}{e^2} (K(e) - E(e)) - \frac{2}{3} \gamma^* a \frac{\sqrt{1-e^2}}{2-e^2} \right] \right\}^{1/3}, \quad \gamma^* = (\beta_1^* + \beta_2^*) / (A_1^{Piezo} + A_2^{Piezo}).$$

Приповерхнева виїмка на границі поділу при стисканні

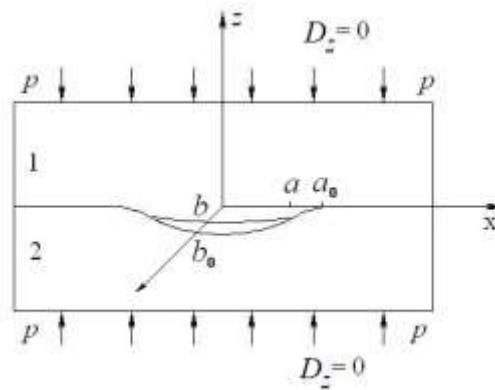


Рисунок 1 – Приповерхнева виїмка

Отримуємо систему інтегро-диференціальних рівнянь з невідомою областю інтегрування

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \iint_{S_1} \frac{h(\xi) d\xi S}{\sqrt{(x-\xi_1)^2 + (y-\xi_2)^2 + z_i^2}} = - \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \iint_{S_0} \frac{r(\xi) d\xi S}{\sqrt{(x-\xi_1)^2 + (y-\xi_2)^2 + z_i^2}} + 2\pi M^* p, \quad (x, y) \in S_1.$$

Після її розв'язання маємо [2]

$$a = a_0 \sqrt{1 - N_0}, \quad b = b_0 \sqrt{1 - N_0}, \quad h = r_0 [1 - N_0]^{3/2}, \quad N_0 = 2M^* p b_0 \sqrt{1 - e_0^2} / (3r_0 E(e_0))$$

При $p \geq p^* = [r_0 3E(e_0)] / (2M^* b_0 \sqrt{1 - e_0^2})$ – повне закриття виїмки.

Пропорційні за висотою жорсткі включення довільного перерізу на границі поділу. Узагальнено результат Елати про пропорційні включення для ізотропних півпросторів на випадок електропружних півпросторів з різними властивостями. Встановлено, якщо жорсткі включення пропорційні за висотою і коефіцієнт пропорційності визначається певним чином з властивостей обох п'єзоелектричних трансверсально-ізотропних матеріалів, то контактні напруження у кожному півпросторі стають тотожними. У частинному випадку отримано узагальнення Гладвела стосовно плоских включень (довільного перерізу) скінченної товщини між ізотропними півпросторами на випадок п'єзоелектричних півпросторів [1]. Отримано аналітичний розв'язок задачі про дископодібне включення скінченної товщини між електропружними півпросторами при стисканні.

Висновки. Таким чином досліджено ряд контактних задач електропружності та термоелектропружності. Встановлено принципові закономірності розподілу контактних



напружень у п'єзоелектричних тілах, які можуть використовуватись при аналізі міцності п'єзоелементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kirilyuk, V.S., & Levchuk, O.I. (2024) Contact interaction of two piezoelectric transversely isotropic half-spaces with rigid flat inclusion of arbitrary shape between them. *International Applied Mechanics* (1), 70 - 79..
2. Kirilyuk, V.S., & [Levchuk, O.I.](#) (2022) Stress contact interaction of two piezoelectric half-space, one of which contains a near-surface notch of elliptical cross-section. *International Applied Mechanics* (4), 436 – 444.
3. Kirilyuk, V.S., & Levchuk, O.I., & Kobzar, P.Yu., & Viter, M.B. (2024) Mathematical modeling of displacement of rigid elliptical disk in piezoelectric space along symmetry axis of material. *International Applied Mechanics* (4), 415 - 421.



Лимарченко Олег¹, Семенович Катерина², Сіренко Олександр³

¹завідувач кафедри, доктор технічних наук, професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, e-mail: olelim2010@ukr.net

²асистент, кандидат фізико-математичних наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, e-mail: kateryna.semenovych@gmail.com

³старший викладач, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, e-mail: olelim2010@ukr.net

КЕРУВАННЯ КОНСТРУКЦІЯМИ З РІДИНОЮ НА ОСНОВІ КОМПЕНСАЦІЇ СИЛОВОГО ВІДГУКУ РІДИНИ

Анотація. Для задач динамки конструкцій з рідиною у випадках сумісного руху складових компонент системи мобільність рідини заважає виконувати точне маневрування. Розроблено нелінійну модель динаміки сумісного руху конструкції і рідини, для якої силова взаємодія складових визначається в аналітичному вигляді. Побудовано алгоритми керування рухом системи на основі компенсації силового відгуку рідини. Розглянуто різні варіанти наближеного визначення силового відгуку рідини і показано вплив цих підходів на точність маневрування конструкцій.

Ключові слова: конструкції з рідиною, вільна поверхня рідини, керування рухом, точне маневрування.

Вступ. При русі конструкцій з рідиною у випадках сумісного руху складових компонент системи мобільність рідини заважає виконувати точне маневрування. Такого роду задачі є складовими елементами аерокосмічних, морських енергетичних систем. Для зменшення впливу рідинного наповнення на рух тіла-носія переважно використовували алгоритми керування оснований на лінійних моделях систем, що не дозволяло в повній мірі моделювати явища, які вимагають залучення нелінійних моделей, а існуючі алгоритми керування рухом не дозволяють розглядати багатовимірні до того ж нелінійні моделі.

На основі варіаційних методів механіки, асимптотичних методів диференціальних рівнянь і методів модальної декомпозиції авторами було розроблено нелінійну модель динаміки сумісного руху конструкції і рідини, для якої силова взаємодія складових визначається в аналітичному вигляді. Запропоновано використати принцип компенсації силового відгуку рідини на рух тіла-носія для зменшення впливу рухомості рідини на рух системи. Такий алгоритм керування не є оптимальним, проте, як свідчать розглянуті приклади, є високо ефективним і порівняно простим. Було застосовано такий алгоритм для



групи задач про усталені і перехідні рухи тіла-носія, при цьому вплив рухомості рідини на рух тіла-носія практично виключався. Для практичних випадків розрізняють три варіанти використання алгоритму керування. Перший, при відомому початковому стані системи пропонується алгоритм керування на основі визначення силового відгуку рідини по нелінійній моделі. Другий, при відомому початковому стані системи силовий відгук рідини визначається за спрощеною схемою. Третій, початковий стан рідини невідомий, відгук рідини визначається наближено на основі даних телеметрії з використанням певних гіпотез математичного характеру. Наведемо приклад.

Для аналізу ефективності таких алгоритмів визначення силового відгуку рідини вивчимо рух системи для випадку початкового динамічного збудження руху системи силовим імпульсом у вигляді прямокутного імпульсу, прикладеного до стінки циліндричного резервуара, тривалість імпульсу вважається меншою за чверть періоду вільних коливань системи ($\tau = 0,25c$). В нелінійній моделі сумісного руху конструкції з рідиною враховується $N = 12$ форм коливань вільної поверхні рідини. Числові результати отримано для вертикально розташованого кругового циліндричного резервуара радіуса $R = 1$ м з глибиною заповнення $H = 1$ м, заповненого водою; маса резервуара приймалась як 10 % від маси рідини (випадок суттєвого впливу рухомості рідини). На рис. 1 приведено залежність в часі поступальної швидкості руху тіла-носія. Крива 1 (суцільна крива) відповідає руху системи без керування для випадку «затверділої» рідини; крива 2 (суцільна крива, яка на малюнку співпадає з кривою 1) відповідає руху системи за наявності рідини і керування на основі принципу компенсації силового відгуку рідини на основі повної інформації про залежність силового відгуку від параметрів руху рідини; крива 3 (штрих-пунктирна крива) відповідає випадку руху рідини без керування; крива 4 (штрихова крива) відповідає руху системи для випадку визначення силового відгуку рідини на основі лінійного наближення. На рисунку всі лінійні розміри віднесено до радіуса резервуара, час задається в секундах.

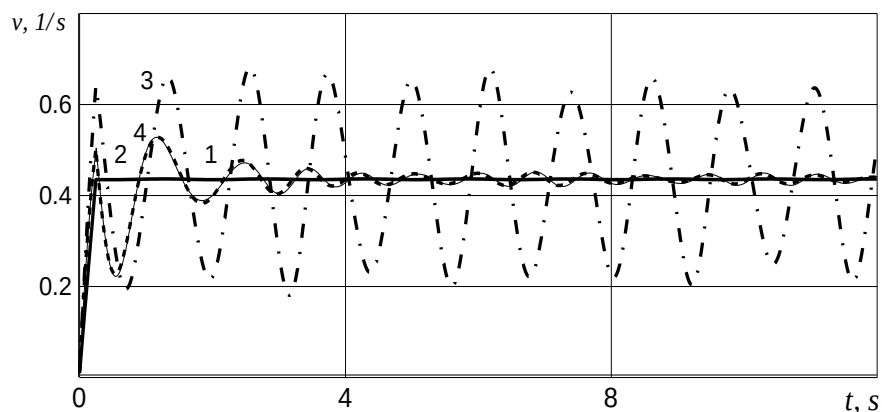


Рисунок 1 – Швидкість руху тіла-носія в часі

З рисунку видно, що у випадку «затверділої» рідини система за час τ набуває максимальної швидкості і надалі рухається з цією постійною швидкістю (крива 1). У випадку руху системи без компенсації силового відгуку рідини система за короткий час набуває швидкість, що спочатку перевершує швидкість, яку б набула система із «затверділою» рідиною (крива 3), а надалі відбуваються коливання швидкості навколо цього сталого значення. При русі системи з керуванням, яке включає компенсацію силового відклику рідини на основі повного використання співвідношення (5), закон руху системи практично збігається із законом руху системи із «затверділою» рідиною (крива 2). Тобто, запропонований алгоритм керування забезпечив з високою точністю рух системи, в якому виключено вплив рухомості рідини на рух конструкції носія. Для випадку визначення відгуку рідини на основі лінійного наближення (крива 4) на початковому етапі руху формується певна розбіжність між значеннями швидкостей руху системи у випадку впливу рухомості рідини і випадку «затверділої» рідини.

Проте з часом така відмінність спадає. Аналогічні залежності одержуються і для випадку одночленного наближення визначення відгуку рідини, які практично збігаються з кривою 4. В більшості нестационарних задач неврахування нелінійних властивостей системи на початковому етапі не призводить до вагомих відмінностей результатів надалі. Проте в цьому випадку з керуванням виходить, що неврахування частини інерційних властивостей системи (за рахунок інерції збудження вищих форм коливань) і частини, яка обумовлена квадратичними і кубічними членами, суттєво відбивається на результаті керування саме на початковому етапі. В той же час алгоритм керування надалі мінімізує цей вплив. В процесі руху коливання вільної поверхні рідини залишаються одного порядку (0,25–0,3 радіуса резервуара) і стають навіть трохи меншими, ніж у випадку руху системи без компенсації силового відклику рідини. В той же час для руху без компенсації з часом стає помітним певне відхилення від синусоїдального закону руху, яке слабо помітне для випадків руху системи з компенсацією рухомості рідини. Запропонована схема керування фактично є керуванням з оберненим зв'язком відносно прискорень амплітуд збурень форм коливань вільної поверхні рідини з їх нормуванням за законом формування силового відгуку рідини, який надалі уточнюється нелінійними членами.

Висновки. Для реалізації високоточного маневрування запропоновано алгоритм керування рухом конструкцій з рідиною, в основі якого лежить принцип компенсації силової взаємодії рідини зі стінками резервуара, що має суттєво зменшити вплив рухомості рідини на рух конструкції–носія. Підхід базується на аналітичних властивостях початкової



нелінійної динамічної моделі сумісного руху конструкції з рідиною і застосовується для вивчення нелінійної динамічної моделі високої розмірності, де використання традиційних підходів до розв'язування задач керування рухом є складним. Показано, що при спрощеному (лінійному) чи одночленному визначенні силового відгуку рідини цей метод дає значні похибки на початковому етапі руху, проте згодом ці відхилення значно спадають і в підсумку вплив рухомості рідини на конструкцію-носій практично виключається.



СЕКЦІЯ 1. ТЕОРЕТИЧНІ І ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ МЕХАНІКИ ТА МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.

Avramov K.¹, Derevianko I.³, Uspensky B.¹,

Salenko A.², Maksymenko-Sheiko K.¹, Chernobryvko M.¹

¹*National Academy of Science of Ukraine, Podgorny Institute for Mechanical Engineering, Kharkiv, Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine*

³*Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine*

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF FUSED DEPOSITION PROCESSED SANDWICH THIN-WALLED STRUCTURES

Abstract. Approach for mechanical characteristic experimental analysis of honeycomb manufactured by fused deposition modeling is suggested. Experimental analyses of shear and tension of the honeycombs specimens fabricated from PLA and ULTEM 9085 materials are performed. The experimental studies are accompanied by the finite element simulations of the shear and the tension experiments.

It is shown experimentally, that the geometrical nonlinearity must be accounted for the honeycomb tension analysis. The force-displacement response of honeycomb tension is nonlinear due to accounting of the geometrical nonlinearity behavior of the structure.

Key words: honeycomb core; fused deposition modeling, shear, force-displacement response.

The honeycomb core, which is part of sandwich thin-walled structures, can be produced by additive manufacturing. Additive manufacturing is used to produce aircrafts parts. Lightweight and robust structures can be produced due to additive manufacturing, as this technology allows obtaining the parts with internal voids.

The shear properties of the honeycombs, which are manufactured by the FDM from PLA and ULTEM 9085 materials, are analyzed experimentally. The forces-shears strains responses are obtained as a result of this experimental analysis. The finite element simulations of these experiments are performed using the commercial software ANSYS. The deformations of the loads applications plates and cells are taken into account in this simulation.

The tensions of the honeycombs are analyzed experimentally too. As follows from this experimental analysis, the displacements of the honeycomb tip are commensurable with its



thickness. Therefore, the geometrically nonlinear deformations of the honeycomb walls are taken into account to perform the finite elements simulations. The deformations of all honeycomb cells are accounted in the finite elements simulation of the specimen tension.

The novelty of this paper is the following. The experimental approach for determination of the honeycombs shear characteristics, which are manufactured by the FDM additive technology, is suggested. This approach permits to study the honeycomb shear properties. The tension of the honeycomb is studied experimentally and numerically. In order to perform the numerical study the geometrical nonlinear computer model is obtained.

The research, which is treated here, helps to design the sandwich thin-walled structure with new core from PLA or ULTEM material.

The approach for the experimental determination of mechanical characteristics of the honeycomb, which is produced by FDM additive manufacturing, is suggested. The special specimen, which consists of two honeycombs and three loads applications plates, are the basis of this approach. Shear characteristics of the honeycomb are obtained by tension of this special specimen. The honeycombs from PLA and ULTEM materials are analyzed experimentally. The forces-shear strains response and shear moduli are obtained as a result of this experiment.

As follows from the honeycomb experimental analysis, the specimen fractures occur in the honeycomb during the shear testing. The brittle fracture of the honeycomb is observed. The glue joints between steel and honeycomb are not fractured.

The computer model based on the finite element method is obtained to simulate the shear experiment. The direct finite element simulation of all cells of two honeycombs with account of three loads applications plates deformations is carried out. The elasticity of the glue joints is not accounted. As follows from the numerical simulations, accounting of the loads applications plates elasticity contributes essentially to the values of the shear characteristics. Thus, the deformations of the loads applications plates must be taken into account in shear characteristics numerical analysis. The calculations results of the honeycombs shear characteristics and the experimental data are close.

The computer model of the shear experiment with accounting the homogenized honeycomb and the loads applications plates deformations is obtained. As follows from the numerical analysis, the data of this model simulation are close to the experimental results.

The tension characteristics of the honeycomb are analyzed experimentally. As follows from the experimental analysis, the displacements of the honeycomb free edge are commensurable with the honeycomb thickness. Therefore, the honeycomb displacements are enough high. The geometrically nonlinear deformations of the honeycomb must be accounted.



The nonlinear behavior of the material is not accounted, as the values of stresses are not very high.

REFERENCES

1. Derevianko, I., Uspensky, B., Avramov, K., Salenko, A., Maksymenko-Sheiko, K. (2023) Experimental and numerical analysis of mechanical characteristics of fused deposition processed honeycomb fabricated from PLA or ULTEM 9085. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol.25, p.264-283.
2. B. Uspensky, B., Derevianko, I., Avramov, K., Maksymenko-Sheiko, K., M. Chernobryvko. (2025) Mechanical properties of auxetic honeycombs realized via additive manufacturing: Experimental testing and numerical studies. *Applied Composite Material*, Vol.32, p. 119-148.



Курпа Лідія¹, Шматко Тетяна² Лінник Ганна³

¹професор, доктор техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», каф. Прикладної математики, Харків, Україна, e-mail: kurpalidia@gmail.com

²професор, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ», каф. Вищої математики, Харків, Україна, e-mail: ktv_ua@yahoo.com

³професор, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ», каф. Прикладної математики, Харків, Україна, e-mail: linnik2105@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ-R ФУНКЦІЙ ДО АНАЛІЗУ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ СЕНДВІЧ ПЛАСТИН З АУКСЕТИЧНИМ СТІЛЬНИКОВИМ ЗАПОВНЮВАЧЕМ

Анотація. В даній роботі розглянуто задачі про вільні коливання сендвич пластин із ауксетичним стільниковим заповнювачем з негативним коефіцієнтом Пуассона. Особливістю роботи є те, що запропонований метод дослідження базується на використанні теорії R-функцій, варіаційного методу Рітца та теорії TSDT. Вважається, що зовнішні шари сендвич структури виготовлені з функціонально градієнтних матеріалів, механічні властивості яких обчислюються за степеневим законом Фойгта. Математична постановка задачі виконана в рамках уточненої теорії пластин першого порядку (FSDT). Для комірки заповнювача обрано шестикутну форму, а ефективні властивості обчислюються за відомими формулами. Наведено тестові приклади та проаналізовано коливання пластин зі складною формою.

Ключові слова: вільні коливання, сендвич пластини, від'ємний коефіцієнт Пуассона, функціонально-градієнтні матеріали, теорія R -функцій, варіаційні методи.

Вступ. В останні часи для виготовлення сендвич пластин та оболонок ефективно використовуються нові матеріали, такі як функціонально градієнтні (ФГМ) та метаматеріали. Як було показано в [1], ауксетичні стільники є одним із найкращих заповнювачів середнього шару сендвич структури, оскільки вони мають екстраординарні механічні властивості, вищу стійкість до зсуву, удару та краще поглинання енергії. Ауксетичні стільникові матеріали з негативним коефіцієнтом Пуассона (NPR) є окремим випадком метаматеріалів. Форма стільникових комірок, виготовлених з ауксетичних матеріалів, може бути різною, але дуже часто застосовуються комірки шестикутної форми. Треба відзначити, що існує велика кількість публікацій, присвячених даній проблемі [1-4]. Як показує огляд літератури, присвячений розрахунку механічних



властивостей метаматеріалів та дослідженню їх статичної та динамічної поведінки пластин типу «сендвіч» зі складною геометричною формою плану майже відсутні.

1. Формулювання проблеми.

В даній роботі розглядаються сендвіч пластини з ауксетичним заповнювачем та ФГМ лицьовими шарами (рис.1а). Припускається, що товщини лицьових шарів однакові. Позначимо загальну товщину пластини h , товщину лицьових сторін h_{ff} , товщину заповнювача h_c . Ефективні властивості ФГМ модуль пружності E_{eff} та щільність ρ_{eff} визначаються згідно степеневому закону, приймаючи до уваги їх зміну вздовж одного напрямку, а саме вздовж товщини оболонки:

$$E_{eff} = (E_c - E_m)V_c + E_m, \quad \rho_{eff} = (\rho_c - \rho_m)V_c + \rho_m, \quad (1)$$

де індекси c та m відповідають характеристикам кераміки та металу відповідно. Для розглянутих задач відповідні вирази для V_c визначаються за наступними формулами:

$$\begin{cases} V_c = \left(\frac{z - h_1}{h_0 - h_1} \right)^p, & z \in \left[-\frac{h}{2}, h_1 \right], \\ V_c = \left(\frac{z - h_2}{h_3 - h_2} \right)^p, & z \in \left[h_2, \frac{h}{2} \right] \end{cases} \quad (2)$$

У формулах (2) індекс p позначає показник об'ємної частки кераміки (градієнтний індекс). Для визначення ефективних властивостей заповнювача ($h_1 < z < h_2$), виготовленого з ауксетичного стільникового матеріалу з NPR та шестикутною формою стільникової комірки (рис. 1б), використовуються відомі співвідношення [2,3]

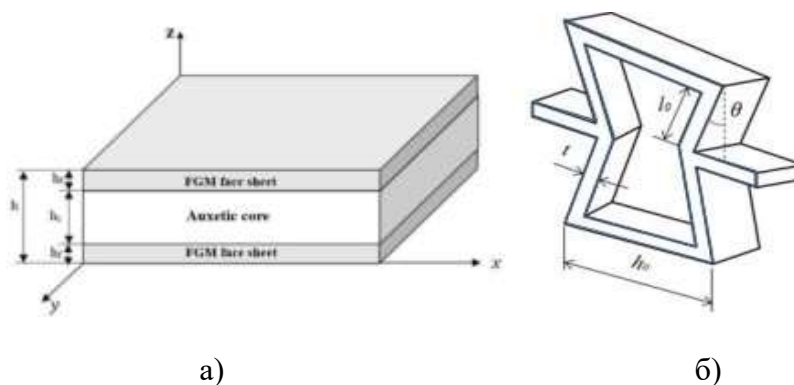


Рисунок1 – Сендвіч пластина з шестикутним ауксетичним заповнювачем

2. Метод розв'язання.



Для розв'язання задачі використовується метод Рітця, згідно якого необхідно скористатися варіаційною постановкою проблеми, що зводиться до знаходження мінімуму наступного функціоналу

$$J = P - \lambda^2 T, \quad (3)$$

де P та T є потенційною та кінетичною енергією оболонки відповідно. Зусилля $N = \{N_{11}, N_{22}, N_{12}\}$, моменти $M = \{M_{11}, M_{22}, M_{12}\}$ та перерізуючі сили $Q = \{Q_x, Q_y\}$, а також потенціальна і кінетична енергії визначаються за формулами, наведеними в [5]. Екстремум функціонала (3) знаходиться на множині функцій, що задовольняють геометричним крайовим умовам. В даній роботі така система у випадку складної геометричної форми, або складних крайових умов будується за допомогою теорії R-функцій [7-8].

3. Числові результати.

Для перевірки створеного забезпечення в рамках системи POLE-RL [9], було розв'язано низку тестових задач і виконано порівняння отриманих результатів з відомими. Розглянуто задачі для пластин складної геометричної форми. Результати представлені у вигляді графіків та таблиць. Наприклад в табл. 1 представлено порівняння результатів, отриманих методом R-функцій з відомими [3] для квадратної сандвіч пластини, лицьові шари якої ізотропні і товщина всіх шарів однакова. Геометричні параметри: $h = 0.1m$, $2a = 2b = 20h$, $t/l_0 = 0.01385$, $h_0/l_0 = 1$; $h_c/h_f = 1.5$.

Матеріальні властивості прийнято наступними: $EE = 69 G$, $G = 26G$, $\nu = 0.33$, $\rho = 2700 \frac{kg}{m^3}$.

Таблиця 1. Порівняння основної частоти $\Lambda = \frac{\lambda}{2\pi} (Hz)$ з результатами роботи [3]

θ^0	CCCC		SSSS		CSCS	
	RFM	[3]	RFM	[3]	RFM	[3]
-10^0	267.75	276.81	150.77	151.55	217.13	222.49
-35^0	264.59	273.55	148.95	149.73	214.57	219.83
-55^0	252.62	261.19	142.05	142.85	204.92	209.68
-80^0	104.84	108.60	58.33	58.96	85.33	86.32



Висновки. В роботі запропоновано метод до розв'язання задач про вільні коливання ауксетичних сендвич пластин складної геометричної форми в рамках уточненої теорії Редді. Метод базується на використанні теорії R-функцій та варіаційних методів. Запропонований підхід планується поширити на дослідження пологих оболонок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Krishna Kumar Saxena, Raj Das and Emilio P. Calius. (2016). Three Decades of Auxetics Research Materials with Negative Poisson's Ratio. A Review, Advanced engineering materials, 18, No. 11.
2. Singh S.J., Harsha S.P., (2021). Free vibration analysis of sandwich plate with honeycomb core and FGM face sheets. Advances in Systems Engineering, Springer, Singapore, 905–917.
3. Quoc T-H, Tu M- T, Tham V-V. (2021). Free vibration and dynamic response of sandwich composite plates with auxetic honeycomb core. J. of Science and Technology in Civil Engineering, HUCE (NUCE), V.15, No 4, 1–14.
4. Pham H.-A., Tran H.-Q., Tran M.-T., Nguyen V.-L., Huong Q.-T. (2022). Free vibration analysis and optimization of doubly-curved stiffened sandwich shells with functionally graded skins and auxetic honeycomb core layer, Thin-Walled Structures 179, 109571.
5. Hui-Shen Shen (2009) Functionally Graded Materials: Nonlinear Analysis of Plates and Shells, CRC Press, Boca Raton, 266 pp.
6. Reddy, J. N. (2011). A general nonlinear third-order theory of functionally graded plates. International Journal of Aerospace and Lightweight Structures, 1, 1-21.
7. Рвачев В.Л. (1982) Теория R-функций и некоторые ее приложения. Киев, Наукова Думка, 552с.
8. Курпа Л.В. (2009) Метод R-функций для решения линейных задач изгиба и колебаний пологих оболочек. Харьков: НТУ«ХПИ», 408с.
9. Рвачев В.Л. Шевченко А.Н. (1988) Проблемно – ориентированные языки и системы для инженерных расчетов. К.: Техника, 197 с.



Бабуров В.В.¹, Гришак В.З.², Клименко Д.В.³

¹ начальник сектору, Державне підприємство «конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпро Україна, e-mail: literator11@i.ua

² д.т.н., професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро Україна Hryshchak.V.Z@nmu.one

³ начальник відділу, к. т. н. Державне підприємство «конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпро Україна, e-mail: Klymenko_dv@hotmail.com

ПРОГНОЗУВАННЯ РУЙНІВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ КОНСТРУКЦІЙ РІЗНОГО СПРЯМУВАННЯ У РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В конструкціях сучасного машинобудування, ракетно-космічної й авіаційної техніки та інших галузях промисловості широке застосування знаходять конструкції складної геометричної форми, зокрема спеціального призначення, які суттєво впливають на несучу здатність досліджуваної системи в цілому.

Аналітичні, у тому числі наближені, методи дослідження напружено-деформованого стану і стійкості силових конструкцій складної конфігурації в реальних умовах експлуатації пов'язані із значними труднощами чисельного аналізу математичних моделей, яким відповідає складна система диференціальних рівнянь в частинних похідних, у загальному випадку із змінними коефіцієнтами, при розв'язанні якої може спостерігатися нестійкість чисельного процесу, що не уможливорює у ряді випадків їх практичне застосування. З іншого боку, як показує практика останніх років, застосування асимптотичних, у тому числі гібридних підходів, дають можливість здобути ефективні розв'язки на стадії проектування реальних систем з подальшим уточненням прогнозованих руйнівних навантажень із застосуванням чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів та його модифікацій.

Конкурентні вироби нової техніки у зв'язку з сучасними представленнями розвитку конкретної галузі промисловості і вирішуваних завдань вимагають вдосконалення процесу проектування конструкцій на базі сучасного математичного забезпечення з врахуванням досвіду використання аналітичних методів дослідження, вітчизняних та зарубіжних систем автоматизованого проектування (САПР або CAD) і систем автоматизації інженерних розрахунків і аналізу (CAE), що дозволяють будувати моделі процесу деформації, вичерпання несучої здатності і візуалізацією руйнування конструкцій складної конфігурації при комбінованому зовнішньому навантаженні.



Дана робота присвячена застосуванню методів аналізу напружено-деформованого стану (НДС) і несучої здатності силових елементів та конструкцій спеціального призначення у реальних експлуатаційних умовах.

Надані оцінка несучої здатності та прогнозування руйнівного навантаження складеної оболонкової конструкції єдиного паливного відсіку літального апарату з порівняльним аналізом розрахункових та експериментальних даних, який показав задовільну збіжність результатів запропонованої розрахункової моделі з використанням фактичних механічних властивостей матеріалу і врахуванням історії навантаження [1]. При проведенні оцінки несучої здатності використовувався метод скінченних елементів і оснований на ньому програмний комплекс MSC.NASTRAN. Розрахунки напружено-деформованого стану проводились з врахуванням геометричної і фізичної нелінійності матеріалу (тип аналізу Nonlinear Static).

Запропонована математична модель трубопроводу з проведенням розрахунків напружено-деформованого стану трубопроводу при послідовному навантаженні конструкції з врахуванням історії навантаження та геометричної і фізичної нелінійності матеріалу [2]. Проведено аналіз напружено-деформованого стану та міцності трубопроводу з урахуванням нерегламентованого силового впливу та залишкових деформацій. Надано аналіз нештатного силового впливу на міцність конструкції і можливість її подальшої експлуатації. При проведенні розрахунків використовувався метод скінченних елементів і оснований на ньому програмний комплекс MSC.NASTRAN. За результатами проведеного аналізу трубопровід допущено до штатної експлуатації у складі виробу. Експлуатація виробу пройшла успішно.

Запропоновано розв'язок задачі, пов'язаної з необхідністю доробки існуючої штатної конструкції з метою вирішення незапланованих конструктивних завдань, які виникають при експлуатації. Дана задача розв'язується на прикладі доробки конструкції для усунення зазорів в шліцьовому з'єднанні [3]. З метою виключення зазорів, які виникають при виготовленні за рахунок допусків, запропоновано виконання повздовжнього різь валу вздовж всієї довжини шліців та встановлення розпірної втулки з попереднім натягом. Проведена оцінка міцності запропонованого варіанту конструкції з використанням попереднього аналітичного аналізу з подальшим застосуванням чисельного алгоритму на базі методу скінченних елементів. При використанні методу скінченних елементів та основаному на ньому програмному комплексу MSC.NASTRAN розрахунки напружено-деформованого стану проводились з врахуванням геометричної та фізичної нелінійності (тип аналізу Nonlinear Static). Отримано задовільну збіжність



розрахунків НДС аналітичним та чисельним методами. При чисельному розв'язку визначено зона концентрацій напружень та їх рівень. Проведено порівняння отриманих експериментальних та розрахункових даних. За результатами проведених розрахунків та випробувань на міцність конструкцію розрізного валу з встановленою розпірною втулкою можливо прийняти до використання у виробі.

Запропоновано розв'язок задачі, пов'язаної з послідовним навантаженням конструкції для врахування на кожному наступному етапі розрахунку напружено-деформований стан попереднього етапу при подальшому навантаженні з новими умовами закріплення. Дана задача розглянута на прикладі оцінки несучої здатності та прогнозування руйнівного навантаження скоби при змінних умовах закріплення та навантаження [4]. Запропонована математична модель, проведено розрахунки напружено-деформованого стану при послідовному навантаженні конструкції з врахуванням історії навантаження та геометричної і фізичної нелінійності матеріалу (тип аналізу Nonlinear Static). Проведена оцінка несучої здатності, та визначено максимальне розтягуюче зусилля на скобу. Порівняння розрахункових та експериментальних даних, отриманих на етапі конструкторських випробувань показало задовільну збіжність результатів.

Обговорюється аналітико-чисельний алгоритм аналізу впливу знаку Гауссової кривини серединної поверхні складеної оболонкової системи на локальне і загальне випинання при дії декількох параметрів біфуркації. Особливістю даної роботи є формулювання постановки і розв'язок задачі про вплив негативного знаку Гауссової кривини на одному з відсіків оболонкової складеної конструкції на її біфуркаційний стан. Розв'язок базується на застосуванні методу скінченних різниць для основних рівнянь стійкості кожного відсіку у випадку, коли один з них може бути з негативною кривиною меридіана, з урахуванням дискретності розміщення проміжних ребер та жорсткості їх з площини початкової кривини. Отриманий розв'язок дозволяє здійснити візуалізацію форми втрати стійкості для різних комбінацій зовнішнього навантаження та визначити раціональні з точки зору рівності по відношенню до локальних і загальних форм біфуркації геометричні та жорсткісні параметри досліджуваної системи. На основі запропонованого підходу надається аналіз стійкості складеної оболонкової конструкції з меридіаном серединної поверхні різної форми, що знаходиться під одночасною дією нерівномірно розподіленого зовнішнього тиску і осьового розтягування - стискання. Досліджений у попередніх роботах [6] вид конструкцій типу 'бочка-оживало'



узагальнений на випадок наявності від'ємного знаку Гаусової кривизни на одному з її відсіків.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Клименко Д.В., Бабуров В.В., Дьяченко Т.П. Прогнозування руйнівного навантаження гладких паливних баків ракет-носіїв на прикладі єдиного паливного відсіку. Сучасні проблеми термомеханіки – 2021: збірник тез Міжнародної наукової конференції. Львів, 2021. С 207–209.
2. Бабуров В.В., Гусев В.В., Клименко Д. В. Аналіз напружено-деформованого стану та міцності трубопроводу з врахуванням нерегламентованого силового впливу та залишкових деформацій. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій, м. Дніпро, 2023, вип.36.
3. Бабуров В.В., Гусев В.В., Клименко Д. В. Аналіз можливості використання розрізного валу в з'єднанні рульового приводу з АДР. Людина і космос: збірник тез XXVI Міжнародної наукової конференції. Дніпро, 2024. С. 10-11.
4. Бабуров В.В. Аналіз напружено-деформованого стану та прогнозування руйнівного навантаження скоби при змінних умовах закріплення та навантаження. Математичні проблеми механіки неоднорідних структур: збірник наукових праць 11-ї Міжнародної наукової конференції. Львів, 2024. С. 205-206.
5. Гришак В.З., Бабуров В.В. Прогнозування руйнівних навантажень та загальної стійкості складених конструктивних систем. Математичні проблеми технічної механіки – 2024: матеріали Міжнародної наукової конференції. Дніпро, 2024. С.137-139.
6. Gristchak V.Z., Hryshchak D.V., Dyachenko N.N., Baburov V.V. The Influence of the Gaussian Curvature Sign of the Compound Shell Structure's Middle Surface on Local and Overall Buckling under Combined Loading/ Космічна наука і технологія, 2022, т21, №4.
8. Лизін В. Т., Пяткін В. А. Проектування тонкостінних конструкцій. — Москва: Машинобудування, 1976. — 408 с.
9. Моссаковский В. И., Макаренков А. Г., Никитин П. И., Саввин Ю. И., Спирidonov I. М. Міцність ракетних конструкцій. — Москва: Вища школа, 1990. — 359 с.
10. Ричков С. П. Моделирование конструкций у среде Femap with NX Nastran. — Москва: ДМК Прес, 2013. — 784 с.
11. Шимкович Д. Г. Розрахунок конструкцій у MSC/NASTRAN for Windows. — Москва: ДМК Прес, 2003. — 448 с.



Пошивалов Володимир

директор, доктор технічних наук, професор, Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Дніпро, Україна, e-mail: vposhivalov@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al-Mg ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Анотація. Досліджений вплив проміжної енергетичної обробки в умовах повзучості на характеристики міцності й мікроструктуру алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6М, який використовується у конструкціях спеціального призначення. Виявлено, що комбінована енергетична обробка, яка включає дію полів різної фізичної природи, збільшує час до руйнування, показники короткочасної міцності матеріалу, ударну в'язкість та дає можливість наблизити його за міцнісними властивостями до сплаву 01570, легованого скандієм. Показано, що збільшення характеристик міцності досягається за рахунок заліковування дефектів і підвищення щільності дислокацій.

Ключові слова: енергетичне навантаження, ганиця текучості, границя міцності, час до руйнування.

Вступ. Під впливом зростаючого енергетичного навантаження в матеріалі послідовно розвиваються процеси пружної й пластичної деформації, зародження й поширення тріщин і, нарешті, руйнування. Навантаження матеріалу в термодинамічно відкритій системі представляє собою типовий синергетичний процес. Тут мова йде про те, що в екстремальних умовах вплив зовнішніх збуджень за рахунок безперервного припливу енергії в матеріалі ініціюються самоорганізаційні процеси, які здатні істотно поліпшити його механічні характеристики [1]. У загальному випадку, джерелами збуджень, що приводять систему в нерівновагий стан, можуть бути енергетичні поля різної фізичної природи: термомеханічний, електромагнітний і ультразвуковий вплив, лазерне випромінювання, плазмова обробка тощо.

До матеріалів, з яких виготовляються захисні протимінні екрани пред'являються ряд вимог: висока пластичність і ударна в'язкість, відносно знижена границя текучості при збереженні максимально можливої границі міцності. Алюмінієві сплави, особливо системи Al-Mg (5083, 5456, АМг6, 01570) значною мірою задовольняють більшості вимог до захисних протимінних екранів, але навіть їх пластичності та ударної в'язкості недостатньо, щоб ефективно поглинати енергію вибуху [2].



Мета роботи – підвищити фізико-механічні характеристики алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6М, який використовується у захисних протимінних екранах, з позиції синергетичного підходу за рахунок проміжної комбінованої енергетичної обробки.

Матеріал і результати досліджень. Випробування проводилися на зразках сплаву АМг6М (Al – 92.65%, Mg – 6.75%). Зразки мали форму подвійної лопатки об'ємом робочої частини $32 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$. Механічні випробування здійснювалися в режимі повзучості при температурі 160°C і напруженні 23.3 МПа.

Зразки попередньо випробовувалися в режимі повзучості приблизно до половини часу їх руйнування, а потім піддавалися проміжній термомеханічній обробці, яка включала дію стискальних і розтягуючих в тепловому полі навантажень, а також ударних ультразвукових коливань. Загальна схема обробки зразків проводилася в наступній послідовності:

- електростимульоване нагрівання зразка електричним струмом до температури $T = 160^\circ\text{C}$;
- одновісне розтягування зразка в режимі повзучості з наступною витримкою приблизно до половини часу руйнування;
- вплив на зразок стискаючого навантаження при температурі $T = 300^\circ\text{C}$; – відпал зразка при $T = 320^\circ\text{C}$;
- вплив на зразок ударними ультразвуковими коливаннями.

Вплив стисненням проводився на зразки в нагрітому стані ($T = 300^\circ\text{C}$) навантаженням $P = 0.5 \text{ MN}$. При цьому в середньому товщина зразка зменшувалася на 35%, ширина збільшувалася на 57%, а довжина – на 4%. Дія ударних ультразвукових коливань здійснювалося за допомогою ударного генератора ультразвуку шляхом сканування бойком ударника по поверхні зразка з частотою 20 кГц. При цьому оптимальна амплітуда коливань випромінювача становила 19.8 μm .

У процесі ультразвукової обробки відбувається пластичне деформування матеріалу, що призводить до зміни його структурного стану. При випробуваннях на повзучість зразків, які зазнали енергетичної обробки, вносились поправки на величину навантаження з урахуванням зміни площі поперечного перерізу.

Дія енергетичних потоків на матеріал оцінювалося за зміною характеристик короткочасної міцності (границя міцності σ_B та границя текучості $\sigma_{0.2}$), тривалої міцності (час до руйнування при повзучості), питомої роботи руйнування зразка W , а також мікроструктурними змінами.



Проміжна пластична деформація при випробуваннях на повзучість досягалася двома способами [3].

Відповідно до першої схеми, зразки спочатку витримувалися під розтягувальним навантаженням приблизно до половини часу руйнування, після розвантаження і охолодження вони піддавалися дії високотемпературного стискаючого навантаження, а за тим здійснювалася ударна ультразвукова обробка. Після цього зразки знову навантажувалися вихідним розтягувальним навантаженням і виводилися на режим повзучості до руйнування.

Згідно з другою схемою, після обробки високотемпературним стискаючим тиском, проводився відпал зразків при температурі $T = 320^{\circ}\text{C}$ протягом двох годин, з подальшим впливом на них ударних високочастотних коливань.

У табл. 1 наведено результати випробувань зразків сплаву АМг6М у вихідному стані та після впливу різних видів проміжної пластичної деформації в режимі повзучості.

Таблиця 1 – Механічні характеристики сплаву АМг6М

Найменування матеріалу	Режим обробки	Границя текучості, $\sigma_{0,2}$, МПа	Границя міцності, σ_B , МПа	Питома робота руйнування, W , МДж/м ³	Відносне. подовження, δ , %	Час до руйнування, τ , 60 ⁻¹ с	$\frac{\tau_1}{\tau_0}$
АМг6М	Необроблений	167.0	333.0	68.2	20	8	–
	I схема	440.0	483.0	17.2	4	240	30
	II схема	250.0	378.0	48.9	14	64	8

Тут $\frac{\tau_1}{\tau_0}$ – відношення часу до руйнування зразка, обробленого за першою та другою схемою, до часу руйнування необробленого зразка.

Висновки. Аналіз результатів випробувань зразків у вихідному стані та після енергетичної обробки показав, що проведення проміжної пластичної деформації в умовах повзучості підвищує характеристики короточасної міцності та час до руйнування сплаву АМг6М (див. таблицю 1). При випробуваннях за першою схемою істотно підвищується час до руйнування при повзучості, проте при цьому різко знижується пластичність матеріалу. Введення відпалу дозволяє підвищити час до руйнування сплаву при відносному збереженні границі текучості.

Крім того встановлено, що енергетична обробка сплаву АМг6М за схемою II дає можливість наблизити його за міцнісними властивостями до сплаву 01570, легованого скандієм, що належить до тієї ж системи Al–Mg, але суттєво дорожчий.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Макклінток Ф., Аргон А. (1994). Деформация и разрушение материалов. М.: Мир.
2. Бісик С. П., Санін А. Ф., Пошивалов В. П., Арістархов О. М., Приходько М. В., Кузьмицька А. І., А. Ф. Леднянський (2023) Комбінований противоударний та протимінний захист на основі деталей з алюмінієвих сплавів. Технічна механіка, (11), С. 76– 89.
3. Пошивалов В. П. (2023) Керування фізико-механічними властивостями алюмінієвих сплавів для підвищення їхніх міцнісних характеристик і використання у конструкціях спеціального призначення. Вісник НАНУ. (11), С. 87 – 92.



Сіренко В. М.

Конструкторське бюро «Південне ім. М.К. Янгеля» (м. Дніпро), Україна

ФУНКЦІОНАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ КОМБІНОВАНОГО ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ

Анотація. Метою доповіді є обговорення деяких сучасних проблем моделювання, методів і алгоритмів функціональної здатності оболонкових конструкцій в умовах температурного і комбінованого силового навантаження з урахуванням технологічних та експлуатаційних особливостей. Основна увага приділяється розробці і створенню ефективних моделей і методів розрахунку несучої здатності складних оболонкових систем на базі фізичного експериментального дослідження та віртуального експерименту із застосуванням сучасних аналітичних і скінчено-елементних комп'ютерних технологій.

Вступ. Ускладнення конструктивних форм сучасного машинобудування, зокрема конструкцій і систем літальних апаратів, інших галузей промисловості при наявності технологічних та експлуатаційних особливостей призводить до необхідності подальшого розвитку механіки з вирішенням проблем побудови уточнених моделей із створенням на базі сучасних комп'ютерних технологій нових експериментально-теоретичних методів дослідження і ефективних розрахункових схем.

Проектування реальних конструкцій і систем на базі математичних моделей дозволяє застосовувати переваги як експериментального, так і теоретичного досліджень з виявленням у відносно короткі терміни та без істотних затрат основні властивості досліджуваної конструкції та характер функціонування її в експлуатаційних умовах. В значній мірі вирішення цієї проблеми сприяє впровадження в промисловість прогресивних аналітичних і чисельних підходів із застосуванням віртуальних експериментів з метою досягнення необхідної конкурентної здатності виробів нового покоління.

Необхідно зауважити, що для використання багатьох програмних обчислювальних комплексів аналізу несучої здатності оболонкових конструкцій при температурному і силовому комбінованому навантаженні однією з найбільш актуальних і складних є проблема побудови адекватних комп'ютерних моделей геометрії реальних об'єктів з



конструктивними особливостями: таких, як наявність підкріплюючого силового набору, отворів довільних розмірів і форм, ділянок змінної геометрії і жорсткості, вплив характеру анізотропії, багатошаровості та пластичних властивостей матеріалу, локалізованих пристроїв, та інші. При цьому суттєва увага приділяється визначенню реальних механічних характеристик застосованих матеріалів.

Теоретичні аналітико-чисельні дослідження задач математичної фізики для областей складної конфігурації, до яких відносяться проблеми аеродинаміки, тепло-масо-переносу, міцності, статичної та динамічної стійкості конструкцій нової техніки залишаються на часі у зв'язку із необхідністю створення ефективних математичних моделей фізичних полів, зокрема силових, поєднання водночас аналітичної і геометричної інформації, застосування новітніх теорій оболонок обертання, ефективного комп'ютерного забезпечення на базі методу скінченних елементів із застосуванням тривимірних і оболонкових елементів, нових технологій формоутворення геометричних об'єктів, наприклад таких, як впровадження теорії R-функцій (RFM) в математичному моделюванні геометрії досліджуваної конструкції та аналізу фізичних полів, Computer Aided Engineering (CAE), Computer Aided Manufacturing (CAM), Computer Aided Geometric Modelling (CAGM), та інших сучасних технологій геометричного моделювання, які розроблені, зокрема, вітчизняними дослідниками.

Слід відзначити, що забезпечення якості розрахунково-експериментальних досліджень на етапі проектування силових елементів конструкцій у значній мірі залежить від методичного та технічного забезпечення фізичних випробувань. Особливу увагу заслуговує розробка методології нормативних основ обґрунтування ресурсу конструкцій, а також проблеми, що визначаються внутрішніми тенденціями розвитку механіки і практичними викликами конструкцій спеціального призначення.

– *Алгоритм геометричного моделювання оболонкових конструкцій з конструктивними та технологічними особливостями, на базі методу скінченних елементів (МСЕ) на основі критеріїв вичерпання несучої здатності конструкцій.*

Автоматизація побудови геометричної моделі складної оболонкової конструкції із застосуванням запропонованих САПР вирішується на базі двох стадій: 1) автоматизації побудови комп'ютерного представлення геометричної моделі; 2) автоматизація побудови дискретної скінчено-елементної моделі. Показано, що від способу вирішення першого завдання залежать зручність, практичність, швидкість побудови і модернізації геометричних моделей у процесі проектування. Другий модуль, як правило, виступає в ролі препроцесора для обчислювальних методів САПР і, як



наслідок, на результати його роботи накладаються жорсткі вимоги щодо форми скінченних елементів і геометричної структури сітки, порушення яких може призводити до значних обчислювальних погрішностей результатів. На основі опису методів і підходів до подання топології геометричних об'єктів, методів отримання та оптимізації дискретних геометричних моделей, запропоновано їх класифікацію з урахуванням використання теорії R-функцій, в якій використовуються безперервні в функції для опису теоретико-множинних операцій. Таким чином, значна увага приділяється функціональному підходу до геометричного моделювання, який є найбільш загальним і універсальним в рішенні задач геометричного моделювання. Що стосується визначення напружено-деформованого стану оболонкових систем, сумісно із фізичним експериментом застосовується скінчено-елементний підхід, в якому розв'язок задачі в переміщеннях зводяться до вирішення систем алгебраїчних лінійних рівнянь.

В якості однієї із актуальних задач розглянуто математичну модель оболонкової системи під внутрішнім тиском при наявності реальної діаграми пружно-пластичних характеристик матеріалу із застосуванням методу скінченних елементів у програмному комплексі «МІРЕЛА+». Зроблені висновки про розташування найбільш «загрозливих» зон руйнування і впливу нелінійних властивостей матеріалу, що приводить до збільшення інтенсивності руйнівного навантаження.

– *Методика віртуальних випробувань напружено-деформованого стану силових вафельних оболонкових конструкцій із застосуванням фізичного експерименту та запропонованому алгоритму оптимізації.*

Обговорюються віртуальні дослідження розрахунку оболонкової системи з урахуванням впливу стовпа рідини і реальної діаграми « σ – ϵ » матеріалу з урахуванням експериментальних даних. Математична модель заснована на оболонкових скінченних елементах. Загальний алгоритм моделювання поведінки конструкції складалась з трьох кроків: 1) побудова дискретної моделі і ітераційне визначення кількості вузлів і елементів, при якому максимальна інтенсивність напружень при лінійному розрахунку буде змінюватися менш ніж на 1% щодо попереднього ітерації; 2) побудова адаптивної дискретної моделі використовується як базова дискретна модель, побудована на першому етапі, зі згущенням елементів в областях найбільшого градієнта інтенсивності напружень при лінійному розрахунку; 3) виконання розрахунку з урахуванням фізичної нелінійності матеріалів за допомогою методу змінної жорсткості на базі отриманої на другому етапі дискретної моделі.



– *Дослідження динаміки підкріпленої циліндричної оболонки, що перебуває під дією локальних навантажень.*

Вважається, що оболонка перебуває під дією локальних навантажень, які розподілені на малих площадках і змінюються на заданому короткому відтинку часу за лінійним законом. Дано висновки про вплив форми імпульсу, часу дії зовнішніх сил та підкріплення оболонки на її деформований стан при локальному навантаженні. Визначено деформований стан замкнутої циліндричної оболонки, підкріпленої перехресною системою ребер, що перебуває під дією розподілених по її поверхні локальних короткочасних навантажень.

– *Нестационарні зворотні задачі теплопровідності для багат шарових тіл.*

Запропоновано розв'язок нестационарних зворотних задач теплопровідності для багат шарових тіл для забезпечення адекватності математичних моделей за наявності експериментальної інформації про досліджуваний тепловий процес. З метою створення ефективних методів діагностики і ідентифікації таких процесів проведені експериментальні дослідження і відповідна обробка результатів. У основу методу аналізу теплопровідності для багат шарових тіл, покладено рішення зворотних задач теплопровідності, зокрема для композитних середовищ. Слід зазначити, що в деяких практичних випадках методи розв'язку зворотних задач є основним засобом отримання необхідної інформації про досліджуваний об'єкт. Запропонована методика дозволяє на основі даних про термометризацію ідентифікувати зміну у часі теплового потоку, що проходить через багат шарову конструкцію.

До переваг застосованого підходу слід віднести слабку чутливість до похибок вимірювань; можливість використання експериментальної інформації як від одного, так і від декількох датчиків; можливість одночасного відновлення теплового потоку на різних частинах поверхні конструктивного елементу; можливість розпаралелювання обчислювального процесу, що відповідає сучасним вимогам, які пред'являються до методів та алгоритмів рішення прямих і зворотних задач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Akimov D. V., Gristchak V. Z., Gomenjuk S. I., Larionov I. F., Klimenko D. V., Sirenko V. N. Finite-element analysis and experimental investigation on the strength of a three-layered honeycomb sandwich structure of spacecraft adapter module. ISSN 0556-171X. Strength of Materials. 2016. № 3. P. 52–57.



2. *Мацевитый Ю.М, Сиренко В.Н., Костиков А.О., Сафонов М.А., Ганчин В.В.*. Решение нестационарных обратных задач теплопроводности для многослойных тел на основе эффективного поиска регуляризирующего параметра ISSN 0131–2928. Journal of Mechanical Engineering, 2019, vol. 22, no. 3.
3. Дегтярев М.А., Шаповал А.В., Гусев В.В., Аврамов К.В., Сиренко В.Н. К оптимизации конструкции вафельных оболочечных отсеков ракетоносителей Проблемы прочности, 2019, N2. - С.62-71.
4. Луговой П.З., Сиренко В.Н., Скосаренко Ю.В., Батутина Т.Я. Динамика дискретно подкрепленной цилиндрической оболочки при действии локального импульсного нагружения. Прикладная механика. — 2017. — Т. 53, № 2. — С. 71-80. — Бібліогр.: 10 назв. — рос.
5. Марчук Михайло, Сиренко Володимир, Харченко Володимир, Клименко Дмитро Математичні моделі та сучасні програмні засоби оцінки міцності елементів ракетно-космічної техніки з композиційних матеріалів. Сучасні проблеми механіки і математики, Збірник наукових праць за загальною редакцією академіків НАН України А.М. Самойленка та Р.М. Кушніра, 2018, С 37-38.



Олександр Григоренко¹, Максим Борисенко², Олена Бойчук³, Наталія Борейко⁴

¹завідуючий відділу обчислювальних методів, доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАНУ, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко НАНУ,

Київ, Україна, e-mail: ayagrigorenko1991@gmail.com

²старший науковий співробітник відділу обчислювальних методів, кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко

НАНУ, Київ, Україна, e-mail: mechanics530@gmail.com

³старший викладач кафедри вищої та прикладної математики, кандидат фізикоматематичних наук, доцент, Миколаївський національний аграрний

університет, Миколаїв, Україна, e-mail: boychuklena27@gmail.com

⁴старший науковий співробітник відділу обчислювальних методів, кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко

НАНУ, Київ, Україна, e-mail: nataliya.petrivna@ukr.net

ВІЛЬНІ КОЛИВАННЯ ШЕСТИКУТНИХ ПЛАСТИН З ОТВОРОМ

Анотація. Розглянуто вільні коливання ізотропних шестикутних пластин з вільними краями та жорстко закріпленим отвором на основі методу скінченних елементів. Встановлено залежність частоти і форми вільних коливань від співвідношення радіуса отвору до радіуса вписаного кола в шестикутник. Реалізовані підходи дають можливість досліджувати динамічні характеристики пластин з отвором інших конфігурацій і можуть бути використані для оцінки точності інших підходів.

Ключові слова: частоти і форми, вільні коливання, шестикутна пластина з отвором, метод скінченних елементів, жорстке закріплення.

Пластини різних форм і способів закріплення широко використовуються в проектуванні складних інженерних споруд, сучасних будівель, а також корпусів різноманітних машин і конструкцій спеціального призначення. Зокрема, корпуси сучасних космічних апаратів облаштовуються термостійкими багатокутними пластинами. В залежності від призначення та функціональності такі пластинчасті елементи можуть мати технологічні отвори, ребра жорсткості, змінну товщину, різні способи закріплення та інші конструктивні неоднорідності. Щоб уникнути руйнування таких споруд під час резонансу, важливо мати дані про розподіл частот і форми вільних коливань кожної окремої пластини.



Сучасні комп'ютерні програмні комплекси автоматизованого проектування, які проводять розрахунки методом скінченних елементів (МСЕ), часто застосовують для визначення частот і форм вільних коливань різних механічних систем [1, 2]. Одним з таких комплексів є FEMAP з розв'язувачем NX Nastran [3], який апробовано на розрахунках частот вільних коливань трикутних [4] та п'ятикутних [5] пластин з отвором з експериментальним підтвердженням отриманих результатів. В [6] розглянуто вільні коливання ізотропних шестикутних пластин різної товщини з вільними краями на основі МСЕ, а в [7] досліджено поперечні коливання тонкої пружної пластини шестикутної форми, наведено деякі частоти та форми вільних коливань пластини з вільними краями та жорстко закріпленими краями.

Метою даного повідомлення є розрахунок методом скінченних елементів частот та форм вільних коливань ізотропних тонких шестикутних пластин закріплених по отвору та встановлення залежності динамічних характеристик від радіуса отвору.

За допомогою FEMAP побудовано геометрії пластин правильної шестикутної форми зі стороною $a=69,28$ мм, товщиною $h=2$ мм, отвором в центрі з різними співвідношеннями радіуса отвору до радіуса вписаного кола в шестикутник r_o/r : 1/12; 1/10; 1/8; 1/6; 1/4; 1/3; 1/2; 2/3; 3/4 та без отвору. Як матеріал пластин був вибраний алюміній з наступними параметрами: модуль Юнга $E=71$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu=0,33$, густина $\rho=2710$ кг/м³. Пластини досліджувались при вільних краях (F_e) та жорстко закріпленому отвору (C_h).

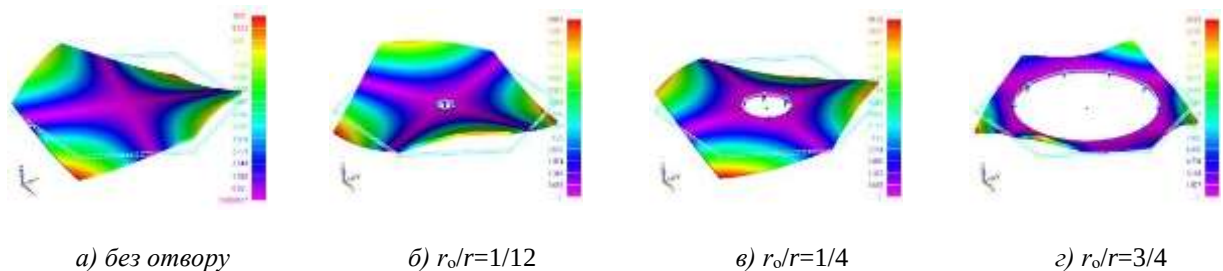


Рисунок 1 – Перша форма вільних коливань шестикутних пластин з отвором та без

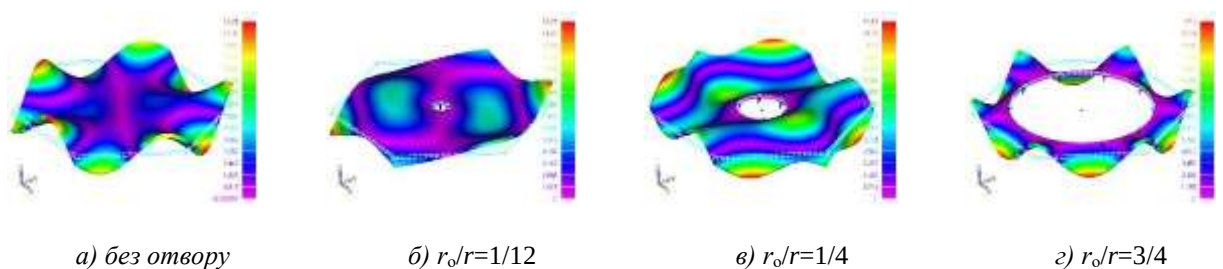


Рисунок 2 – Десята форма вільних коливань шестикутних пластин з отвором та без



В результаті розрахунків отримано частоти та форми вільних коливань шестикутних пластин з отвором та без. Для порівняння наведені (рис. 1, 2) форми вільних коливань деяких розглянутих пластин.

Висновки. Поширено метод скінченних елементів для визначення частот і форм вільних коливань тонких ізотропних шестикутних пластин з жорстко закріпленим отвором різного радіусу з вільними краями. Встановлено збільшення частоти вільних коливань пластин із збільшенням радіуса жорстко закріпленого круглого отвору. Перші дві форми коливань є однаковими для всіх розглянутих співвідношень r_0/r , наступні форми коливань не є однаковими, спостерігається спотворення форм коливань за рахунок збільшення полів нульових переміщень навколо жорстко закріпленого отвору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chen, Y., Jin, G., Zhu, M., Liu, Z., Du, J., & Li, W. L. (2012). Vibration behaviors of a box-type structure built up by plates and energy transmission through the structure. *Journal of Sound and Vibration*, 331 (4), 849-867.
2. Shi, X., & Shi, D. (2018). Free and forced vibration analysis of T-shaped plates with general elastic boundary supports. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 37 (2), 355-372.
3. Рудаков, К.Н. (2011). FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. К. НТУУ «КПИ».
4. Grigorenko, O.Y., Borisenko, M.Y., Boichuk, O.V., & Vasileva, L.Y. (2021). Free Vibrations of Triangular Plates with a Hole. *International Applied Mechanics*, 57 (5), 534–542.
5. Григоренко, О.Я., Борисенко, М.Ю., Бойчук, О.В., Сперкач, С.О., & Безугла, А.Д. (2023). Вільні коливання п'ятикутних пластин з отвором. *Допов. Нац. акад. наук Укр.*, (1), 24–31.
6. Grigorenko, A., Borysenko, M., Boychuk, O., & Boreiko, N. (2024). Numerical Analysis of Free Vibration Frequencies of Hexagonal Plate. In *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods* (pp. 201-220). Cham: Springer Nature Switzerland.
7. Laura, P. A. A., & Rossi, R. E. (2002). Transverse vibrations of a thin, elastic plate of regular hexagonal shape. *Journal of Sound Vibration*, 256 (2), 367–372.



Олександр Азюковський¹, Дмитро Гаркавенко²,

Кирило Зіборов³, Сергій Федоряченко⁴

¹ректор, к.т.н., доцент, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: azalex@nmu.one

²асистент кафедри КТЕД, аспірант, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: harkavenko.d.v@nmu.one

³декан ММФ, к.т.н., доцент, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: ziborov.k.a@nmu.one

⁴завідувач кафедри КТЕД, к.т.н., доцент, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: fedoriachenko.s.o@nmu.one

ПОСТАНОВКА І РОЗВ'ЯЗОК НЕЛІНІЙНОЇ ЗАДАЧІ ЗОВНІШНЬОЇ БАЛІСТИКИ СИСТЕМ ІЗ ЗМІННИМИ ЗА ЧАСОМ ПАРАМЕТРАМИ В УМОВАХ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. Обговорюється застосування аналітико-чисельного розв'язку задачі про визначення функціональних параметрів зовнішньої балістики нелінійної системи із змінними у часі параметрами при наявності початкової швидкості маси в умовах атмосферного тиску, лобового та бічного вітрового навантаження.

Ключові слова: наближений аналітичний розв'язок, зовнішня балістика, нелінійна система, змінні у часі параметри, аеродинамічний тиск, вітрове навантаження.

Вступ. Проблема визначення параметрів зовнішньої балістики та функціонування реальних конструкцій при наявності початкової швидкості в умовах атмосферного тиску, лобового та бічного вітрового навантаження пов'язана із необхідністю інтегрування просторової системи нелінійних диференціальних рівнянь із змінними коефіцієнтами, що при застосуванні точних аналітичних і прямих чисельних підходів є задачею досить складною, особливо при необхідності отримання оцінок ефективності алгоритму розрахунку. Слід зауважити, що точні аналітичні розв'язки вказаної проблеми, які зводяться до системи нелінійних диференціальних рівнянь із змінними коефіцієнтами, можуть бути здобуті лише у виняткових випадках.

У даній роботі пропонується одна з постановок досліджуваної проблеми і запропоновано математичну модель, яка зводиться до системи зв'язаних нелінійних диференціальних рівнянь із змінними коефіцієнтами, базове з яких є нелінійним



диференціальним рівнянням Рікатті першого порядку відносно функції проекції швидкості маси на вісь ординат. Зведення до лінійного диференціального рівняння другого порядку із змінними коефіцієнтами і, застосування гібридного асимптотичного підходу та алгоритмів комп'ютерної алгебри до розв'язку нелінійного сингулярного рівняння, дає можливість отримати наближений аналітичний розв'язок задачі. Здобуто аналітичні та графічні залежності, які у ряді випадків достатньо корелюються із прямими чисельними розрахунками, що дозволяє надати відповідні оцінки застосованого розв'язку.

Розглядається тривимірна нелінійна динаміка вантажу маси $m(t)$, який рухається з початковою швидкістю V_0 з літального апарату висоти h при наявності лобового $V_{\text{вх}}$ та бічного $V_{\text{вz}}$ вітрового потоків на базі нелінійної теорії балістики.

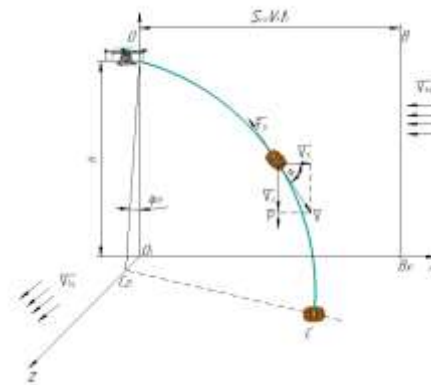


Рисунок 1 – Схематичне зображення задачі

Основна система пов'язаних диференціальних рівнянь зовнішньої балістики досліджуваного динамічного процесу дається з проекцій діючих на масу $m(t)$ сил відповідно на осі системи координат x , y та z :

$$\sum x: \frac{d}{dt} [m(t)(V_x + V_0 \mp V_{\text{вх}})] = -F_c \sin \alpha - F_{\text{вх}}; \quad (1)$$

$$\sum y: \frac{d}{dt} [m(t) \cdot V_y(t)] = F_c \cos \alpha - m(t)g; \quad (2)$$

$$\sum z: \frac{d}{dt} [m(t)(V_z \mp V_{\text{вz}})] = -F_c \sin \beta - F_{\text{вz}}. \quad (3)$$

Основні параметри досліджуваної системи визначаються наступними формулами:



$$F_c = C_x \cdot \frac{S_M \cdot \rho}{2} \cdot V^2(t), \quad F_{Bx} = C_{Bx} \cdot \frac{S_{Mx} \cdot \rho}{2} \cdot V_{Bx}^2, \\ F_{Bz} = C_{Bz} \cdot \frac{S_{Mz} \cdot \rho}{2} \cdot V_{Bz}^2 \quad (*)$$

де $\vec{F}_c$, $\vec{F}_e$ – сили аеродинамічного супротиву конструкції із стабілізатором, включаючи $\vec{F}_{cm}$, та вітрового навантаження відповідно;

C_x – коефіцієнт лобового опору (визначається з експериментальних даних у напрямку руху;

C_{Bx}, C_{Bz} – коефіцієнти бічного опору, який обчислюється із заданих початкових умов у напрямку осей X і Z ;

S_M, S_{Mx}, S_{Mz} – площі міделя тіла вздовж осі обертання тіла і у ортогональних напрямках;

ρ – щільність повітря.

Застосовуючи нові безрозмірні параметри

$$X = \frac{x}{h}, \quad Y = \frac{y}{h}, \quad Z = \frac{z}{h}, \quad T = \frac{t}{t_0}, \quad (4)$$

де $t_0 = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ – час вільного падіння вантажу у без атмосферному середовищі, і враховуючи нерівності $\frac{V_x^2}{V_y^2} < 1$, $\frac{V_z^2}{V_y^2} < 1$, отримуємо систему диференціальних рівнянь у виді:

$$\sum X : \frac{dV_X(T)}{dT} + A(T)V_X(T) + B(T)V_X(T)V_Y(T) = C_X(T); \quad (5)$$

$$\sum Y : \frac{dV_Y(T)}{dT} + A(T)V_Y(T) = -B(T)V_Y(T)^2 - G_0; \quad (6)$$

$$\sum Z : \frac{dV_Z(T)}{dT} + A(T)V_Z(T) + B(T)V_Z(T)V_Y(T) = C_Z(T), \quad (7)$$

де

$$A(T) = t_0 a(t); \quad B(T) = \frac{\varepsilon b_0 h}{f(T)}; \quad C_x(T) = -\frac{t_0^2}{h\{a(T)[V_{0x} - V_{Bx}] + F_{Bx}\}}$$



$$F_{Bx} = \frac{c_{Bx} s_{mx} \rho V_{Bx}^2}{[2m(t)]}; \quad F_{Bz} = \frac{c_{Bz} s_{mz} \rho V_{Bz}^2}{[2m(t)]} \quad (8)$$

$$b_0 = \frac{S_m \cdot \rho}{m_0}, \quad \varepsilon = \frac{c_x}{2}, \quad m(T) = m_0 f(T), \quad \frac{\dot{f}(T)}{f(T)} = \dot{\tilde{f}}(T), \quad G_0 = \frac{t_0^2 g}{h} = 2$$

Зводячи рівняння (6) до рівняння другого порядку і, застосовуючи гібридний асимптотичний підхід із застосуванням методів збурення за параметром нелінійної складової $\varepsilon = \frac{c_x}{2}$ і фазних інтегралів з метою розв'язку системи диференціальних рівнянь із змінними коефіцієнтами, отримується наближений аналітичний розв'язок нелінійної задачі спеціального класу систем із змінними у часі параметрами і зовнішнього середовища, який підпорядковується застосуванню умов руху і заданим початковим умовам.

Висновки. Основні залежності і підхід до вирішення досліджуваної задачі можуть бути використані для застосування прямих чисельних методів аналізу математичної моделі, а також уточненого аналітичного підходу прикладних задач динаміки із застосуванням принципу ортогоналізації за Гальоркіним. В якості подальших досліджень у даному напрямку слід вказати, зокрема, вплив вітрового навантаження, залежного від часу, урахування ефекту Магнуса у обертальних конструкціях, а також вирішення проблеми керування системами із змінними у часі параметрами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азюковський О.О., Гаркавенко Д.В., Грищак В.З., Зіборов К.А., Федоряченко С.О. Аналітичний підхід до розв'язку задачі нелінійної динаміки систем із змінними за часом параметрами в умовах реакції зовнішнього середовища.-Збірник наукових праць НГ -2023 - № 72 -С. 186-193.
2. Gristchak V.Z. To the criterion for application of aerodynamic calculation in solving the non-linear external ballistic problems. Доп. «Потурайівські читання», National Technological University, Dnipro, 2024.
3. Ольшанський В.П, Ольшанський С.В. Динаміка матеріальної точки у руховому повітряному середовищі. / *Ольшанський В.П, Ольшанський С.В.* // 2012.
4. Ольшанський В.П, Дубовик О.А. Питання зовнішньої балістики вогнегасних речовин./ *Ольшанський В.П, Дубовик О.А.* //-Х. Митець, 2005.-236 с.



5. Steele C. R. Asymptotic Analysis and Computation for Shells. Analytical and Computational Models of Shells / C. R. Steele // CED. – 1989. – Vol. 3. – P. 3–31.
6. Gaetan Kerschen. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. / Gaetan Kerschen, Keith Worden, Aleksander F. Vakakis, Jean-Claude Golinval. // Int. J. Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – 20. – P. 505 – 592.



Богданов В'ячеслав¹, Назаренко Володимир², Кіпніс Олександр³

¹завідувач відділу, доктор фізико-математичних наук, академік НАН України,
Інститут механіки ім. С.П Тимошенка НАН України, м. Київ, Україна, e-mail:

Bogdanov@nas.gov.ua

²в.о. директора, доктор технічних наук, академік НАН України, Інститут механіки ім.

С.П Тимошенка НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: nazvm1@gmail.com

³старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, Інститут
механіки ім. С.П Тимошенка НАН України, м. Київ, Україна, e-mail:

a.l.kipnis@gmail.com

СТИСК КУСКОВО-ОДНОРІДНОЇ ПІВПЛОЩИНИ З ДВОХ РІЗНИХ ВИСОКОЕЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ВЗДОВЖ МІЖФАЗНОЇ ЗОНИ ГЛАДКОГО ПРОКОВЗУВАННЯ

Анотація. В рамках лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл розглянуто задачу плоскої деформації про стиск вздовж міжфазної зони гладкого проковзування кусково-однорідного конструкційного тіла, яке являє собою напівобмежену підкладку, жорстко з'єднану з шаром тонкого покриття. Визначені критичні деформації, що відповідають початку руйнування та вивчено характер їх залежності від фізико-механічних та геометричних параметрів задачі; досліджено вплив структури пружних потенціалів високоеластичних компонентів тіла на критичні параметри навантаження.

Ключові слова: матеріал з покриттям, зона проковзування, межа поділу середовищ

Вступ. Ефективним методом дослідження таких неklasичних задач механіки руйнування, в яких тіла знаходяться в умов стиску вздовж площин розташування тріщин, є використання співвідношень лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл у поєднанні з критеріями руйнування, розвиненими в її рамках [1]. При цьому в низці випадків застосування такого підходу допускає можливість одержати розв'язальні рівняння в загальному вигляді для тіл, виконаних зі стисливих або нестисливих високоеластичних матеріалів з довільною структурою їх пружних потенціалів, а конкретизація моделей матеріалів відбувається лише на фінальному етапі чисельного дослідження цих рівнянь.



Представлене дослідження присвячене визначенню критичних параметрів навантаження кусково-однорідного напівобмеженого тіла при його стиску вздовж зони гладкого проковзування, розташованої на прямолінійній меші поділу двох різних високоеластичних матеріалів. Умови гладкого проковзування визначають найслабший тип зв'язку між компонентами кусково-однорідного тіла [2].

Постановка задачі. Інтегральне рівняння Фредгольма першого роду. В умовах плоскої деформації в рамках статичної задачі розглянемо кусково-однорідне конструкційне тіло, що складається з напівобмеженого однорідного тіла (підкладки), яке з'єднано з шаром тонкого покриття. Межа поділу середовищ містить дефект довжиною $2a$ у вигляді зони гладкого проковзування; поза зоною проковзування матеріали жорстко з'єднані між собою; межа тіла $x_2 = h$ є вільною від напружень (рис. 1).

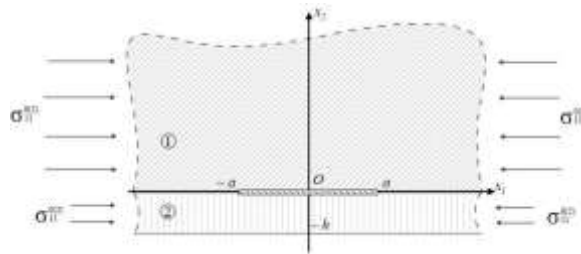


Рис. 1. – кусково-однорідна півплощина при стиску вздовж міжфазної зони гладкого проковзування довжиною $2a$

Граничні умови відповідної лінеаризованої задачі теорії стійкості [1] мають вигляд:

$$\begin{aligned} t_{22}^{(2)} = 0, \quad u_1^{(2)} = 0 \quad (x_2 = -h, \quad 0 \leq |x_1| < \infty); \\ t_{22}^{(1)} = t_{22}^{(2)}, \quad t_{21}^{(1)} = t_{21}^{(2)}, \quad u_1^{(1)} = u_1^{(2)} \quad (x_2 = 0, \quad 0 \leq |x_1| < \infty); \\ t_{21}^{(2)} = 0 \quad (x_2 = 0, \quad |x_1| \leq a), \quad u_2^{(1)} = u_2^{(2)} \quad (x_2 = 0, \quad |x_1| > a), \end{aligned}$$

де $t_{kl}^{(i)}$, $i, k, l = 1, 2$ – збурення компонент несиметричного тензору напружень Піоли –

()ⁱ

Кірхгофа $\bar{t}$, $\bar{u}$ – вектор збурення переміщень.

Сформульовану задачу з використанням загальних представлень розв'язків лінеаризованих рівнянь рівноваги через гармонічні потенціальні функції [1] зведено до задачі на власні значення для інтегрального Фредгольма першого роду вигляду [3]

$$\int_0^1 K(\xi, \eta) g(\eta) d\eta = \text{const}, \quad \beta = h/a, \quad 0 \leq \xi < 1, \quad 0 \leq \eta \leq 1$$

відносно невідомої безрозмірної функції $g(\eta)$ і невідомої константи const , яка пов'язана

з додатковою умовою:



Ядро інтегрального рівняння $K(\xi, \eta)$ є відомою функцією, вигляд якої залежить від комбінації співвідношень між коренями характеристичних рівнянь, що відповідають пружному потенціалу кожного з матеріалів кусково-однорідного тіла [1].

Деякі числові результати. Числове дослідження одержаної задачі на власні значення проведено методом Бубнова – Гальоркіна.

В якості прикладу розглянемо випадок, коли кусково-однорідне тіло є нестисливим, а складові матеріали тіла описуються потенціалом Трелоара [4] або потенціалом Бартенєва – Хазановича [5]. Розглянуто всі чотири можливі випадки комбінацій цих пружних потенціалів; відповідні позначення кривих на наведені нижче:

Номер кривої	Пружний потенціал матеріалу "1"	Пружний потенціал матеріалу "2"
1	Трелоара	Трелоара
2	Трелоара	Бартенєва – Хазановича
3	Бартенєва – Хазановича	Трелоара
4	Бартенєва – Хазановича	Бартенєва – Хазановича

На рис. 2 зображено залежності критичних деформацій ε_1 від геометричного параметра $\beta = h/a$ значеннях відношення жорсткостей матеріалів тіла $g = \mu^{(2)} / \mu^{(1)} = 1; 1.5; 3$.

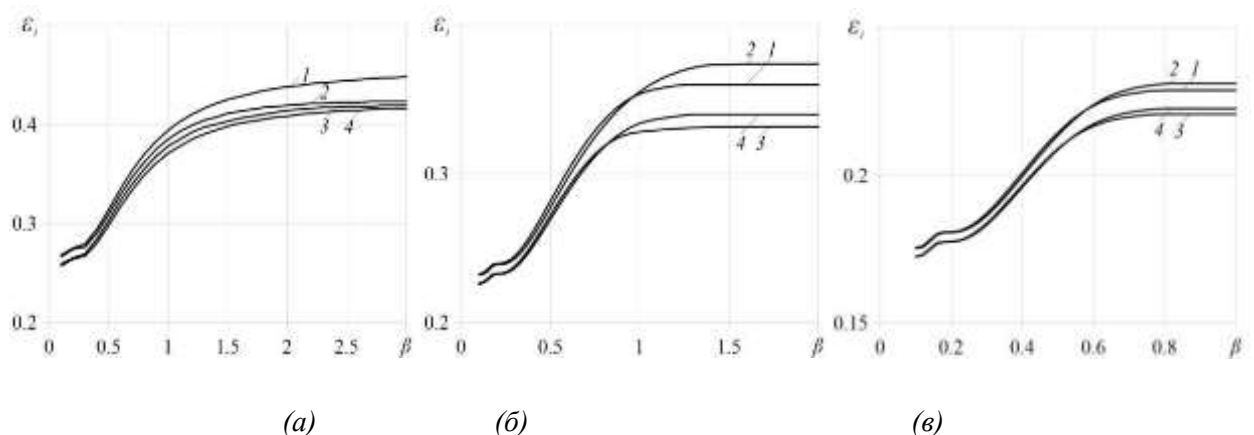


Рис. 2 – залежності $\varepsilon_1(\beta)$ для різних комбінацій пружних потенціалів для нестисливих тіл: (а) – $g = 1$; (б) – $g = 1.5$; (в) – $g = 3$.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Guz, A. N. (1999). *Fundamentals of the Three-Dimensional Theory of Stability of Deformable Bodies*. Springer.
2. Guz, I.A., Menshykova, M., & Soutis, C. (2016) Internal instability as a possible failure mechanism for layered composites. *Phil Trans R Soc A* 374:20160019.
3. Bogdanov, V. L., Nazarenko, V. M., & Kipnis, A. L. (2025). Compression of a semi-bounded body with a coating layer along the interface sliding zone. *ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 105(1).
4. Treloar, L. R. G. (1955). Large elastic deformations in rubber-like materials. In *IUTAM Colloquium* (pp. 208–217).
5. Bartenev, G.M., & Khazanovich, T.N. (1960) On the law of highly elastic deformations of network polymers. *Vysokomolekulyarnyye Soyedineniya* 2(1):21–28



Сметанкіна Н.В.¹, Місюра С.Ю.², Місюра Є.Ю.³

¹завідувач відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень, д-р техн. наук,
проф., Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України,
Харків, Україна, nsmetankina@ukr.net

²доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в
інженерії, канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «ХПІ»,
Харків, Україна, serhii.misiura@khpri.edu.ua

³доцент кафедри економіко-математичного моделювання, канд. техн. наук,
доцент, Харківський національний економічний університет ім. С.
Кузнеця, Харків, Україна, misuraeu@gmail.com

АНАЛІЗ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ БАГАТОШАРОВОГО СКЛІННЯ ЛІТАКІВ

Анотація. Запропоновано підхід до розрахунку термонапруженого стану багатошарових склопакетів літальних апаратів. Елемент скління розглядається як незамкнена циліндрична багатошарова оболонка під впливом міжшарових плівкових джерел тепла. Досліджено температурні напруження в багатошаровому склінні літаків типу Ан. Результати підтверджено шляхом порівняння з експериментальними даними.

Ключові слова: багатошарове скління, нагрівальний елемент, температурні напруження.

Вступ. Однією з актуальних задач у сучасній техніці є задача достовірного визначення теплового стану елементів конструкцій. Від її успішного розв'язання залежить надійність і ефективність роботи елементів різних конструкцій, які часто мають неоднорідну структуру [1, 2]. Сучасне обігрівне скло літака є складною великогабаритною багатошаровою конструкцією, яка містить шари, властивості яких істотно відрізняються, та внутрішні джерела тепла [3]. Її працездатність залежить в першу чергу від міцності і довговічності скляних елементів, параметрів адгезійних шарів та конструкційних рішень, які б забезпечували необхідну термостійкість і міцність покрівельного шару при циклічному навантаженні та дії екстремальних експлуатаційних факторів [4].

Метою роботи є розробка методики розрахунку температурних полів і напружень у багатошарових конструкціях з плівковими джерелами тепла. Методика застосовується для встановлення причин розтріскування електрообігрівного скла літаків типу Ан та



розробки рекомендацій по підбору максимально можливої питомої потужності електрообігрівних елементів для цих виробів.

Матеріал і результати досліджень. Скло розглядається як багат шарова оболонка з неканонічною формою в плані, яка зібрана з шарів постійної товщини. На зовнішніх поверхнях відбувається конвективний теплообмін, а на границях контакту шарів розташовані розподілені плівкові джерела тепла. Температурні поля визначаються з розв'язку нестационарної задачі теплопровідності. Такий підхід дозволяє досліджувати термонапружений стан скління при впливі різних джерел тепла, у тому числі міжшарових, без додаткових гіпотез щодо розподілу температур. Деформації шарів оболонки описуються у рамках теорії першого порядку, що враховує деформації поперечного зсуву й обтиснення по товщині у кожному шарі. Рівняння термопружної рівноваги та граничні умови одержані з варіаційного принципу.

Якщо багат шаровий елемент конструкції має неканонічну форму в плані, то для розрахунку в більшості робіт застосовуються чисельні методи. Використання аналітичних методів пов'язане з подоланням математичних труднощів, які викликані описом геометричних параметрів багат шарових тіл складної конфігурації, умов сполучення шарів з урахуванням внутрішніх джерел тепла, наявністю шарів що істотно розрізняються теплофізичними властивостями. У цьому дослідженні пропонується аналітичний підхід до розв'язання задач теплопровідності і термопружності [5]. Вихідна багат шарова оболонка довільної форми в плані занурюється в допоміжну багат шарову оболонку з тією же композицією шарів. Форма цієї оболонки та граничні умов обираються таким чином, щоб можливо було одержати простий аналітичний розв'язок. Щоб забезпечити виконання реальних граничних умов, до допоміжної оболонки вздовж границі вихідної оболонки додаються додаткові компенсуючі джерела, потужність яких визначається з системи інтегральних рівнянь.

Аналіз інформації про стекла, що вийшли з ладу під час експлуатації, показав, що в більшості випадків руйнування починалося посередині сторін або у кутах поверхні, що обігрівається. Для встановлення причин розтріскування покривних стекел була проведена серія повірочних розрахунків стекел на міцність з урахуванням теплових навантажень, пов'язаних з налаштуванням температури відключення живлення нагрівальних елементів та їх підвищеною питомою потужністю. Результати розрахунку порівнювалися з даними, зареєстрованими в польоті при питомих потужностях $0,8 \text{ Вт/см}^2$ та $0,75 \text{ Вт/см}^2$. Розрахункові графіки при цьому практично збігалися між собою. Це показує, що зменшення номінальної потужності до $0,75 \text{ Вт/см}^2$ не погіршує обігрівної



властивості скла. Проведено розрахунок термонапруженого стану скління літаків типу Ан. Встановлено, що стекла мають завищену питому потужність джерела тепла, що призводить до швидкого зміння температури в шарах, і на певних режимах польоту викликає температурні напруження, які є близькими до допустимих. Як показав розрахунок, підвищені температурні напруження локалізуються у кутах та посередині джерела електрообігріву, що збігається з експериментальними даними.

Висновки. Розроблено методику дослідження термонапруженого стану елементів багатошарового електрообігрівного скління літаків зі складною формою плану, яка враховує геометрію області на аналітичному рівні, що підвищує точність отриманих результатів. Встановлено вплив концентрації напружень в кутах і по межі області джерела тепла. Запропонований метод може бути використаний для подальшого аналізу температурних напружень у багатошаровому склінні сучасних літальних апаратів під впливом плівкових джерел тепла. Також запропонована методика може бути використана при проєктуванні багатошарових елементів конструкцій аерокосмічної техніки під впливом навантажень різної природи [6].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ostrowski, P., & Jędrysiak, J. (2017). Heat conduction in periodic laminates with probabilistic distribution of material properties. *Heat Mass Transfer* 53(4), 1425–1437. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1908-0>
2. Smetankina, N., Semenets, O., Merkulova, A., Merkulov, D., & Misura, S. (2023). Twostage optimization of laminated composite elements with minimal mass. In *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE-2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, 536, Springer, Cham, (p. 456–465). https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_42
3. Hontarovskiy, P.P., Smetankina, N.V., Ugrimov, S.V., Garmash, N.H., & Melezhyk, I.I. (2022). Computational studies of the thermal stress state of multilayer glazing with electric heating. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy mashynobuduvannia*, 25(1), 14–21. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.02.014>
4. Сметанкіна, Н.В., Шупіков, О.М., & Угрімов, С.В. (2016). Математичне моделювання процесу нестационарного деформування багатошарового скління при розподілених та локалізованих силових навантаженнях. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 3(58). 408–413. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2016_3_78



5. Smetankina, N.V., Postnyi, O.V., Misura, S.Yu., Merkulova, A.I., & Merkulov, D.O. (2021). Optimal design of layered cylindrical shells with minimum weight under impulse loading. In *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, IEEE (506–509). <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.956998>
6. Gontarovskiy, P., Smetankina, N., Garmash, N., & Melezhyk I. (2021). Numerical analysis of stress-strain state of fuel tanks of launch vehicles in 3D formulation. In: *Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds.) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering-2020*, 188. Springer, Cham (p. 609-619). https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_52



Ушакова Віра¹, Ушаков Олексій²

¹старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук,
інститут механіки С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна e-mail:

creep@inmech.kiev.ua

²заступник начальника центру, інститут спеціальної техніки та судових
експертиз СБУ, Київ, Україна e-mail: nddkr_igte@ssu.gov.ua

ДО ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКРЕТНИХ ЗНАЧЕНЬ ЯДЕР СПАДКОВОСТІ В ОБЛАСТІ СИНГУЛЯРНОСТІ В НЕЛІНІЙНІЙ СПАДКОВІЙ ТЕОРІЇ

Анотація. Розглянуто метод визначення параметрів ядер спадковості в нелінійній спадковій теорії з незалежною від часу нелінійністю. Дискретні значення ядер отримано виходячи з механічного змісту функції подібності ізохронних діаграм і діаграми миттєвого деформування. Дискретні значення в області сингулярності враховані з використанням вагових функцій. Апроксимація дискретних значень ядер з використанням вагових функцій суттєво покращує апроксимацію, що призводить до більш точних розрахунків.

Ключові слова: Нелінійна спадкова теорія, ядра спадковості, область сингулярності, вагові функції, функція подібності.

Вступ. Однією з основних задач спадкової теорії в'язкопружності є задача вибору структури ядер спадковості, визначення їх резольвент, а також визначення параметрів ядер. Ця задача зводиться до пошуку ядер повзучості та релаксації, що характеризують основні механічні властивості в'язкопружних матеріалів. Ядра спадковості входять у визначальні рівняння, що встановлюють залежність між напруженнями, деформаціями і часом. Існують різні аналітичні структури ядер, а також різні методи визначення їх параметрів. Основні труднощі, що виникають при виборі аналітичної структури пов'язані з необхідністю одночасного врахування дискретних значень в області сингулярності, а також значень в області великих значень часу t . Окрім того, ядра повинні бути аналітично зворотними, щоб за значеннями ядер повзучості можна було ідентифікувати ядра релаксації. Ще однією складністю для різних теорій є труднощі точного виміру швидкостей повзучості ті релаксації на початкових стадіях випробувань, коли з'являються динамічні ефекти, які викликані миттєвим прикладанням навантажень. Значення цих швидкостей є суттєво більшим ніж



можуть виміряні приладами реєстрації. В даній роботі запропоновано метод визначення параметрів з використанням вагових функцій, що зменшують вплив експериментальних значень, що спотворюють загальну картину.

Дискретизація ядер спадковості, вагові функції. В роботі розглянуто метод визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів в нелінійній спадковій теорії. Одновимірні визначальні рівняння теорії запишемо у вигляді [1, 2]

$$\varphi_0(\varepsilon(t)) = \sigma(t) + \lambda \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau; \quad \sigma(t) = \varphi_0(\varepsilon(t)) - \lambda \int_0^t R(t-\tau)\varphi_0(\varepsilon(\tau))d\tau, \quad (1)$$

де перше рівняння описує процес повзучості, а друге – процес релаксації, $\varepsilon(t)$, $\varepsilon(\tau)$ - повна деформація, що включає пружну компоненту ε^e і деформацію повзучості ε^c в моменти часу t і τ ; $\sigma(t)$, $\sigma(\tau)$ - напруження, що діє в моменти часу t і τ ; $\varphi_0(\cdot)$ - функція, що задає діаграму миттєвого деформування; $K(t-\tau)$ - ядро повзучості; $R(t-\tau)$ - ядро релаксації; λ - реологічний параметр; $\lambda > 0$; t - час спостереження; τ - час, що передує моменту спостереження. Реалізуючи процедуру апроксимації дискретні значення ядер повзучості, що отримані на початковому проміжку часу $\{0, t^*\}$, враховуються з використанням вагових функцій. Тоді задача зводиться до мінімізації функціоналу

$$F(\lambda, q_s) = \sum_{j=1}^{n_s} \left\{ p_j(t) [K(t_j) - \lambda K(t, q_s)] \right\}^2 + \sum_{j=n_s}^n [K(t_j) - \lambda K(t, q_s)]^2, \quad (2)$$

де вагова функція $p_j(t)$ задається співвідношенням

$$p_j(t) = \frac{1}{1 + \left| \frac{K(t_j) - \lambda K(t, q_s)}{K(t_*) - \lambda K(t_*, q_s)} \right|^m}, \quad (3)$$

причому $p_j(t) \rightarrow 0$, при $K(t, q_s) \rightarrow \infty$, і $p_j(t) \rightarrow 1$, якщо $K(t_j) = \lambda K(t, q_s)$.

Тут q_s - параметри ядер повзучості $(s=1, k)$; n - число дискретних значень ядер повзучості.

Остаточні значення вагових функцій $p_j(t)$ встановлюються виходячи з сумарної похибки

$$\delta = \sum_{j=1}^{n_s} \left\{ p_j(t) [K(t_j) - \lambda_0 K(t, q_{s0})] \right\}^2, \quad (4)$$

яка відповідає квадратичній похибці першої суми (2) і фактичній похибці функціоналу

Висновки. Ефективність запропонованого методу визначення параметрів ядер спадковості нелінійно-в'язкопружних матеріалів досягається за рахунок введення вагових



функцій в області сингулярності. Метод дозволяє досить точно визначити параметри ядер спадковості за даними випробувань на одновісну повзучість при постійних навантаженнях і характеристикам діаграми миттєвого деформування. В результаті застосування методи отримуємо задовільну апроксимацію дискретних значень ядер як в області сингулярності так і для великих значень часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Резнік В.С., Ушаков О.В., Щодо визначення параметрів ядер поперечної повзучості // Матеріали міжнародної наукової конференції «Форум інженерів механіків» до 125-річчя заснування КПІ ім. Ігоря Сікорського та навчально-наукового Механікомашинобудівного інституту. – Київ : ММІ НТУУ „КПІ” ім. І.Сікорського, 2023. – С. 41-44.
2. Голуб В.П. Щодо розрахунку релаксації напружень у тонкостінних циліндричних оболонках з лінійно-в'язкопружних матеріалів // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, серія фізико-математичні науки. – 2021. – №4. – С. 29-34



Чумак Костянтин¹, Мартиняк Ростислав²

¹докторант, к.ф.-м.н., ст.н.с., Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна, e-mail: chumakostya@gmail.com

²провідний науковий співробітник, д.ф.-м.н., професор, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна, e-mail: mrostyslav@gmail.com

АДГЕЗІЙНА ВЗАЄМОДІЯ МІКРОТЕКСТУРОВАНОЇ ЖОРСТКОЇ ОСНОВИ ТА ПРУЖНОГО ПІВПРОСТОРУ ЗА КОНТАКТУ ПОВЕРХОНЬ В МЕЖАХ ІНТЕРФЕЙСНИХ ЗАЗОРІВ

Досліджено контакт жорсткої основи, текстурованої мікрОВІЙМКАМИ прямокутної форми, та пружного півпростору за наявності ділянки контакту та зон адгезії в межах кожної виїмки. Побудовано аналітично-числовий розв'язок сформульованої задачі та проаналізовано вплив зовнішнього навантаження, сил адгезії та геометричних параметрів текстури на розподіл контактного тиску, еволюцію зазорів, ділянок контакту та зон адгезії.

Ключові слова: адгезійний контакт, модель Можіса-Дагдейла, поверхнева мікротекстура, прямокутна виїмка, інтерфейсний зазор.

Адгезія поверхонь має істотний вплив на функціонування сучасних мікро- і нано-електромеханічних (MEMS/NEMS) пристроїв, знижуючи їх ефективність і надійність та зумовлюючи їх несправність [1]. Раптове збільшення площі контакту між поверхнями, що зближуються (jump-in), стрибкоподібне порушення адгезійного зв'язку поверхонь під дією розтягувальних зусиль (jump-out), а також адгезійний гістерезис (для відриву поверхонь потрібна більша сила, ніж та, що була необхідна для їх початкового з'єднання) є поширеними явищами для адгезійної взаємодії поверхонь тіл. Мікротекстурування є одним із найпопулярніших методів модифікації контактуючих поверхонь для контролю адгезії та покращення їх функціональних характеристик.

Дана робота присвячена дослідженню контакту пружного півпростору S_1 , поверхня якого є ідеально плоскою, та жорсткої основи S_2 , текстурованою розташованими з періодом d виїмками прямокутної форми сталої глибини $r(x) = -A$ та ширини a ($A \ll a$). Тіло S_1 перебуває в умовах плоскої деформації та притискається до тіла S_2 рівномірно розподіленими на нескінченності зусиллями інтенсивності p (рис. 1). Поверхні тіл контактують на ділянці ширини b в межах кожної виїмки. На ділянках (—



$c, -b'$) та (b, c) , де відстань між поверхнями тіл не перевищує значення $h_0 \approx 0.97\varepsilon$ (ε - рівноважна відстань між поверхнями), діють сили адгезії сталої інтенсивності c_0 (модель Можіса-Дагдейла [2]).

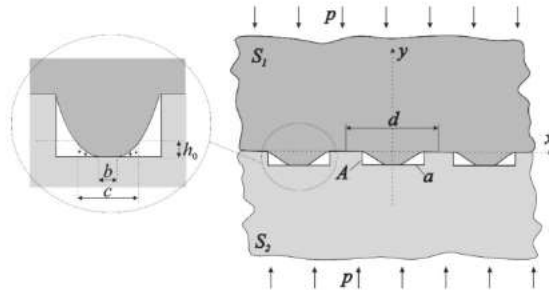


Рисунок 1 – Модель контакту тіл

Зважаючи на вищесказане, крайові умови сформульованої задачі мають вигляд (оскільки задача періодична, умови наведено лише для інтервалу $|x| < d/2$):

$$\sigma_{xy} = 0, u_y = 0, a \leq |x| \leq d/2; \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_0, b/2 < |x| \leq c/2, \quad \sigma_{yy} = 0, c/2 < |x| < a/2, \quad \sigma_{xy} = 0, |x| < a/2; \quad (2)$$

$$\sigma_{xx} = 0, \sigma_{yy} = -p, \sigma_{xy} = 0, \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty. \quad (3)$$

Тут σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{yy} – компоненти тензора напружень, u_y – компонента вектора переміщень в напрямку осі y .

З використанням розробленої в праці [3] методики дослідження адгезійного контакту тіл з текстурованими поверхнями цю задачу зведено до наступного сингулярного інтегрального рівняння (СІР) відносно похідної висоти зазору h (ε)

$$\int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{h'(\eta)}{\eta - \xi} d\eta = \frac{dK}{2} \frac{p + \sigma(\xi)}{\xi^2 + 1}, \quad h(\pm\alpha) = 0, \quad (4)$$

Де $\sigma(\xi) = \sigma_0$, $\beta < |\xi| \leq \chi$, $\sigma(\xi) = 0$, $\chi < |\xi| < \alpha$ та $\sigma(\xi) = -P(\xi) = \sigma_{yy}$, $|\xi| \leq \beta$; $\xi = tg(\pi x/d)$, $\eta = tg(\pi t/d)$, $\alpha = tg(0.5\pi a/d)$, $\beta = tg(0.5\pi b/d)$, $\chi = tg(0.5\pi c/d)$; $K = 4(1 - \nu_1^2)E_1$, E_1 та ν_1 модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона матеріалу тіла S_1

Розв'язавши рівняння (4) аналітично, знайдемо похідну висоти зазору

$$h'(\xi) = h'_1(\xi) + \frac{dK}{2\pi^2\sqrt{\alpha^2 - \xi^2}} \int_{-\beta}^{\beta} \frac{\sqrt{\alpha^2 - \eta^2} P_1(\eta)}{(\eta^2 + 1)(\eta - \xi)} d\eta, \quad |\xi| < \alpha, \quad (5)$$

$$\text{де } h'_1(\xi) = \frac{dK}{2\pi^2\sqrt{\alpha^2 - \xi^2}(\xi^2 + 1)} \left[\sqrt{\alpha^2 + 1} (\pi p + 2\sigma_0 \Psi(\alpha, \chi)) \xi + \frac{\sigma_0}{2} \sqrt{\alpha^2 - \xi^2} (\Gamma(\alpha, \xi, \chi) - \Gamma(\alpha, \xi, -\chi)) \right],$$

$$P_1(\xi) = P(\xi) + \sigma_0, \quad \Psi(\alpha, \chi) = \arctan \left(\frac{\chi \sqrt{\alpha^2 + 1}}{\sqrt{\alpha^2 - \chi^2}} \right), \quad \Gamma(\alpha, \xi, \chi) = \ln \left| \frac{\alpha^2 - \chi \xi + \sqrt{(\alpha^2 - \xi^2)(\alpha^2 - \chi^2)}}{\alpha^2 - \chi \xi - \sqrt{(\alpha^2 - \xi^2)(\alpha^2 - \chi^2)}} \right|.$$

Оскільки

$$h'(\xi) = 0, |\xi| \leq \beta; \quad h(-\beta) = h(\beta) = 0, \quad (6)$$



для знаходження $P_1(\xi)$ отримаємо наступне СІР:

$$\int_{-\beta}^{\beta} \frac{\sqrt{a^2 - \eta^2} P_1(\eta)}{(\eta^2 + 1)(\eta - \xi)} d\eta = -\frac{2\pi^2 \sqrt{a^2 - \xi^2}}{dK} h_1'(\xi), \quad |\xi| < \beta, \quad (7)$$

розв'язок якого знайдено за допомогою методу колокацій [4].

Задовольнивши умови $h(-\beta) = 0$ та $h(-\chi) = h_0$, для знаходження ширини ділянки контакту та ширини зони адгезії отримано систему двох трансцендентних рівнянь, розв'язок якої знайдено числово.

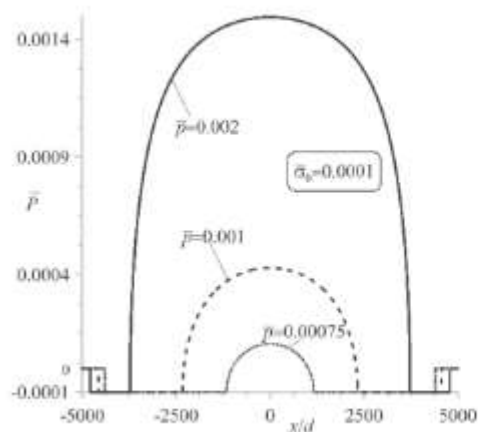


Рисунок 2 – Розподіл контактного тиску в межах виїмки

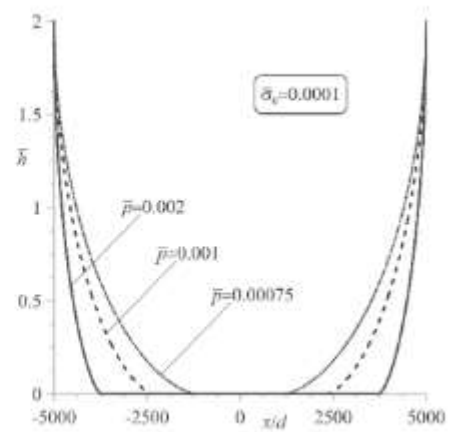


Рисунок 3 – Форма зазору

Рис. 2 ілюструє розподіл контактного тиску $\bar{P} = KP$ в межах виїмки, а рис. 3 – форму зазору для різних значень зовнішнього навантаження $\bar{p} = Kp$, сил адгезії $\bar{\sigma}_0 = K\sigma_0 = 0.0001$ та наступних геометричних параметрів текстури жорсткої основи: $a = 0.3d = 10^4 h_0$, $A = 2h_0$.

Контактний тиск досягає максимального значення в центрі ділянки контакту, рівний $-\bar{\sigma}_0$ на її кінцях та в зонах адгезії. Збільшення навантаження $\bar{p}$ зумовлює збільшення контактного тиску, ширини ділянки контакту та закриття зазору між поверхнями тіл.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Berman, D., & Krim, J. (2013). Surface science, MEMS and NEMS: Progress and opportunities for surface science research performed on, or by, microdevices. *Prog. Surf. Sci.*, (88), 171–211.
2. Maugis, D. (1992). Adhesion of spheres: The JKR-DMT transition using a Dugdale model. *J. Colloid Interface Sci.*, (150), 243–269.
3. Chumak, K. (2016). Adhesive contact between solids with periodically grooved surfaces. *Int. J. Solids Structures*, (78–79), 70–76.
4. Golberg, M.A. (1990). *Numerical Solution of Integral Equations*. Springer Science+Business Media.



Акімов Д.В.¹, Клименко Д.В.²

¹ начальник сектору, канд. техн. наук. Державне підприємство
«конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпро Україна,
e-mail: Akimoff2017@gmail.com

² начальник відділу, канд. техн. наук. Державне підприємство
«конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпро Україна,
e-mail: Klymenko_dv@hotmail.com

ВІДПРАЦЮВАННЯ МІЦНОСТІ ПАЛИВНОГО ВІДСІКУ ТРЕТЬОГО СТУПЕНЯ РН «ЦИКЛОН-4» НА РЕЖИМИ НАВАНТАЖЕННЯ ВИРОБІВ 5000, 7000 ПІД ЧАС СТЕНДОВИХ ВИПРОБУВАНЬ РОЗРАХУНКОВИМ ШЛЯХОМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ ТА ШЛЯХОМ ПРОВЕДЕННЯ ПОПЕРЕДНІХ СТАТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Анотація. Відповідно до вимог норм міцності необхідне проведення відпрацювання міцності паливного відсіку (ПВ) третього ступеня РН «Циклон-4» на режими навантаження, що реалізуються під час проведення стендових випробувань 5000 і 7000. Відпрацювання міцності проводилось як розрахунковим шляхом із використанням програм скінченно-елементного аналізу Femap, MSC.Nastran, так і шляхом проведення попередніх статичних випробувань. Після визначення напружено-деформованого стану ПВ та аналізу отриманих результатів було проведено попередні статичні випробування ПВ на режими навантаження виробів 5000, 7000 під час стендових випробувань з імітацією в лабораторних умовах найважчих випадків навантаження. За результатами розрахунків і експериментального відпрацювання ПВ третього ступеня РН «Циклон-4» було допущено до стендових випробувань 5000 і 7000. Проведені стендові випробування 5000 і 7000 показали позитивні результати, як з погляду міцності конструкції ПВ, так і з погляду виконання цілей і завдань стендових випробувань.

Ключові слова: паливний відсік; скінченно-елементна модель; аналіз напружено-деформованого стану, попередні статичні випробування; стендові випробування 5000 і 7000.

Вступ. На етапі проектування відповідно до вимог норм міцності [1], такі елементи ракетної техніки, як паливні відсіки, проходять послідовне наземне експериментальне відпрацювання. Пневмогідрравлічна система подачі (ПГСП) 3 ступеня



проходить наземні випробування у складі виробів «5000» і «7000». Виріб «5000» призначений для автономного відпрацювання ПГСП (без двигуна), виріб «7000» - для вогневих стендових випробувань рухової установки. Обидва вироби комплектуються ПВ. Для підтвердження міцності було проведено розрахункові роботи та попередні статичні випробування ПВ.

Матеріал і результати досліджень. Для визначення напружено-деформованого стану (НДС) корпусу ПВ була побудована скінченно-елементна модель в програмному комплексі NASTRAN, при цьому була врахована фізична (для матеріалів корпусу) і геометрична нелінійність. Були отримані картини ПДВ і максимальні значення напружень [2]. Проведені розрахунки та отримані коефіцієнти запасів міцності показали, що міцність корпусу ПВ 3-го ступеня для виробів «5000», «7000» достатня.

Під час проведення попередніх статичних випробувань на режими навантаження виробів 5000, 7000 при стендових випробуваннях перевірено:

- циклічну міцність ПВ і отримано підтвердження його циклічної міцності на режими навантаження 5000 і 7000;
- міцність ПВ і отримано підтвердження його міцності для випадку навантаження «робота маршового двигуна 3-го ступеня під час стендових випробувань 7000»;
- міцність ПВ 3-го ступеня й отримано підтвердження його міцності для випадку навантаження «Максимальний внутрішній надлишковий тиск».

За результатами статичних випробувань отримано дані щодо несучої здатності ПВ 3-го ступеня під час навантаження максимальним внутрішнім надлишковим тиском до руйнування. Дані щодо несучої здатності приведено до натурних умов експлуатації ПВ 3-го ступеня й отримано підтвердження його міцності [3], а також результати щодо коефіцієнтів запасу міцності елементів ПВ 3-го ступеня: для порожнини «О» - 1,12, для проміжного днища порожнини «О» - 1,26, для порожнини «Г» - 1,02. Проведено порівняння експериментальних значень коефіцієнтів міцності та їхніх значень, отриманих в результаті розрахунків, відзначено задовільний збіг. Проведено порівняння лінійних переміщень елементів паливного відсіку з розрахунковими значеннями, відзначено задовільний збіг [4].

Результати попередніх статичних випробувань ПВ позитивні. Паливний відсік допущено до стендових випробувань 5000 і 7000.

Після проведення дефектації ПВ були внесені зміни до конструкторської документації (КД) паливного відсіку в частині зміни зварних швів у районі розпірних шпангоутів. За результатами подальшого відпрацювання міцності ПВ на режими



навантаження під час експлуатації ракети-носія (наземна експлуатація, роботи на стартовому столі, політ ракети-носія, вивід третього ступеня на орбіту поховання (пасивація), було підтверджено правильність реалізованих змін у КД паливного відсіку після попередніх статичних випробувань.

Проведені стендові випробування 5000 і 7000 також показали позитивні результати, як з погляду міцності конструкції ПВ (з урахуванням змін у КД), так і з погляду виконання цілей і завдань стендових випробувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДКБП. ЦНДІМаш «Норми міцності ракети-носія Циклон-4», 2004
2. Шимкович Д. Г., Розрахунок конструкцій у MSC/NASTRAN for Windows. Москва: ДМК Прес, 2003. 448 с.
3. Ларіонов І. Ф., Клименко Д. В., Акімов Д. В. Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану паливного відсіку РКП під час навантаження надлишковим внутрішнім тиском до руйнування. Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні. Тези доповідей I Міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 10-14 вересня 2018). Харків, 2018. С. 38.
4. Лізін В. Т, Пяткін В. А. Проектування тонкостінних конструкцій. Москва: «Машинобудування», 1976. 408 с.



Роменська Ольга¹, Деревянко Ігор²

¹начальник групи, доктор філософії, державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна,

e-mail: RomenskaOP@science.yuzhnoye.com

² провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук, Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: DereviankoII@science.yuzhnoye.com

МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ ГРАДІЄНТНО-НАВАНТАЖЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА МАТЕРІАЛІВ

В цій роботі наведено методологію дослідження шаруватих конструкцій із неметалевих матеріалів в умовах одностороннього механічного та температурного навантаження, що максимально наближені до реальних умов експлуатації виробу. Представлено опис необхідного для проведення експерименту обладнання. Докладно вказаний процес експериментального випробування при односторонньому нагріванні конструктивно-подібних градієнтно-навантажених зразків конструкцій.

Ключові слова: випробування, міцність, нагрів, шаруваті конструкції, неметалеві матеріали.

Великий вплив на характеристики міцності конструкції вносять швидкість механічного та температурного навантаження [1]. В залежності від вказаних обставин характеристики матеріалів проявляються по-різному. Тим паче, все більш широкого застосування отримують конструкції градієнтного типу, що складаються з різних за структурою та властивостями неметалевих матеріалів, чим забезпечують стійкість і працездатність продукту сучасного виробництва в широкому діапазоні температур від плюс 40 до плюс 1700 °С, працюючого під навантаженням. З метою оцінки характеристик таких конструкцій проводяться їх дослідження, але класичні методики дослідження, що запропоновані ДСТУ, ГОСТ, ASTM не дозволяють в повній мірі оцінити властивості новітніх матеріалів [2], в деяких випадках при цьому руйнування внутрішніх шарів за рахунок вигорання відбувається раніше дії навантаження через не адаптованість обладнання та класичних методологій випробування. Тому актуальним питанням сьогодення є розробка нових методик, в тому числі таких, що дозволяють



оцінити властивості матеріалу та конструкцій в будь-якому шарі, на будь-якій глибині (товщині) за умов градієнтного прогріву та дії тиску.

Запропонована методика полягає в односторонньому нагріванні та навантаженні матеріалу шляхом стискання між рухомим штоком (ненагрітим) і нерухомим нагрітим до температури випробування пласким нагрівачем.

Для відпрацювання ходу подій дослідження використовується універсальна випробувальна машина Tira Test-2300, яка включає силову раму із вбудованим електромеханічним приводом, вакуумну термокамеру, систему контролю вакуумного і інертного середовища, штатну систему автоматичного нагрівання та контролю температури досліджуваної конструкції. На рисунку 1 представлена термокамера з елементами нагрівання та навантаження дослідного матеріалу.



Рисунок 1 –Термокамера з елементами нагрівання та навантаження матеріалу:

- 1 – верхній нерухомий шток; 2 – нижній рухомий шток; 3– графітовий нагрівач; 4 – зразок конструкції, що досліджується; 5 – вогнетривка заслонка;
6, 7 - термопари

Процес випробування при односторонньому нагріванні включає наступні стадії:

1. Розігрівання нагрівача до заданої температури, при цьому досліджуваний матеріал закривається вогнетривкою заслінкою. Тривалість виходу на режим залежить



від потужності термокамери й теплофізичних властивостей матеріалу (в ході відпрацювання методики випробування експериментально встановлено час нагрівання зразку температури 1350°C становить 10 хвилин).

2. Підведення нижнього рухомого штока з наконечником і зразком досліджуваного матеріалу до нагрітого верхнього нерухомого штоку (зазор 1-2 мм) зі швидкістю 500 мм/хв (рекомендована швидкість холостого ходу випробувальної машини). Установлення зовнішнього екстензометра для вимірювання переміщення штока (розміщується внизу під термокамерою). За цей час нижня поверхня зразку і поверхня наконечника нижнього рухомого штока розігріваються до 100-200 °С, при температурі нерухомого нагрітого плоского нагрівача 900-1350 °С.

3. Механічне навантаження зразка досліджуваного матеріалу до зусилля 7-8 кН зі швидкістю 10 мм/хв, потім розвантаження, реєстрація зміни зусилля і переміщення в реальному режимі часу (зусилля обирається із очікуваного руйнівного зусилля і становить ~ 1% від нього). За цей час температура нижньої поверхні зразку піднімається на 150-250 °С. При розвантаженні температура практично не змінюється.

4. Вимикання нагрівання, відведення зразку досліджуваного матеріалу від нагрівача, падіння температур на обох штоках. Таким чином, тривалість процесу випробування від моменту видалення захисної заслінки до моменту досягнення максимального навантаження і вимикання нагрівання складає близько 8-10 хвилин.

Запропонована методика апробувалася при випробуванні теплозахисних покриттів градієнтного типу на стиск при односторонньому зовнішньому нагріві. Зразки теплозахисного покриття, що досліджували, представляли собою пакет, який складався із чотирьох різних за структурою та властивостями матеріалів, аналогічних приведеним у [3-4].

Створена новочасна методика оцінки властивостей матеріалу в будь-якому шарі, на будь-якій глибині (товщині) при односторонньому нагріванні дозволяє під час випробувань на конструктивно-подібних градієнтно-навантажених зразках реалізувати експлуатаційні навантаження та отримати характеристики шаруватих конструкцій із неметалевих матеріалів.

Також методика дозволяє визначити характеристики міцності під впливом температури та рівномірного стискання, що являється актуальною розробкою для вивчення й аналізу високоміцних та високоякісних шаруватих продуктів сучасного виробництва.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dimitrienko, J.I. (1997). *Mehanika kompozicionnyh materialov pri vysokih temperaturah. Mechanics of composite materials at high temperatures.* Mashinostroenie, Kyiv, Ukraine.
2. Холявко В.В., Владимирський І.А., Жабинська О.О. (2016). Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів. Видавництво «Центр учбової літератури», Київ.
3. Симбіркіна, А., Потапов, О., Погребна, Е., Татарінова, Н., Гусарова, І., Дерев'янко, І., Роменська, О. (2020). Експериментальне підтвердження можливості використання тонкошарового теплозахисного покриття НТЗП-У в складі теплозахисного пакету матеріалів для вузлів ракетно-космічної техніки. У Збірнику тез доповідей 10 міжнародної конференції лакофарбових матеріалів (с. 88-91).
4. Дерев'янко, І., Шевцов, Є., Потапов, О., Манько, Т., Гусарова, І., Суєтова, Н. (2019). Теплозахисна плиткова конструкція для багаторазового космічного апарата (Патент України № 136926 UA).



Галаган Павло¹, Деревянко Ігор²

¹Інженер, Аспірант, ДП КБ Південне, Дніпро, Україна, e-mail:

galaganpro@gmail.com ²Провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук,

ДП КБ Південне, Дніпро, Україна, e-mail: DereviankoII@science.yuzhnoye.com

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАМІНИ КОНТАКТНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО АМПЛІТУДНОГО ТІНЬОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ НА ТЕПЛОГРАФІЧНИЙ

При виготовленні сучасних аерокосмічних виробів широко використовуються ультразвукові методи контролю клейових з'єднань металевих та композитних матеріалів. Велика площа клейових з'єднань окремих конструкційних рішень передбачає довготривалий процес проведення контролю. В роботі запропоновано використання інфрачервоного теплографічного контролю в якості альтернативного швидкого методу контролю клейових з'єднань. Відпрацювання цього методу підтвердило раціональність заміни.

Ключові слова: Теплозахисні композитні матеріали, клейові з'єднання, теплографічний контроль.

В сучасних умовах важливу роль відіграють прискорення виробництва, його масштабування та спрощення. Обмежувачими факторами є відсутність достатньої кількості кваліфікованих співробітників, складність рекрутингу нових працівників та їх навчання, що обмежує масштабування окремих операції виробництва, і як наслідок потребує їх прискорення.

В таких умовах заміна контактного ультразвукового амплітудного тіньового методу контролю стає не тільки актуальною, але і необхідною умовою для спрощення та прискорення виробництва. Доречність розробки та впровадження інфрачервоного теплографічного методу контролю була доведена під час виконання перевірки клейових з'єднань металевих силових оболонок трубчастої конструкції та тканини теплоізоляційної, просоченої епоксидним сполучним. Такі вироби мають велику площу клейових з'єднань та обмежений двосторонній доступ до поверхонь контролю з середини, що передбачає довготривалий складний процес проведення контролю.

В ході контролю теплове навантаження прикладалось поступово по всій внутрішній контрольованій поверхні виробу потоком повітря температурою 120°C.



Теплове навантаження проводилось за допомогою промислового фену. Інфрачервоне теплографічне зображення фіксувалося на зовнішній поверхні виробу за допомогою тепловізора Flir A320. Дефекти клейових з'єднань виявлялися на теплографічному зображенні (рис. 1), як темні області на контрасті зі світлою областю температурного градієнту. Виявлення темних областей свідчить про локальні затримки прогріву цих областей відносно фронту теплового навантаження, створеного в середині виробу, і наявність дефектів клейового з'єднання.

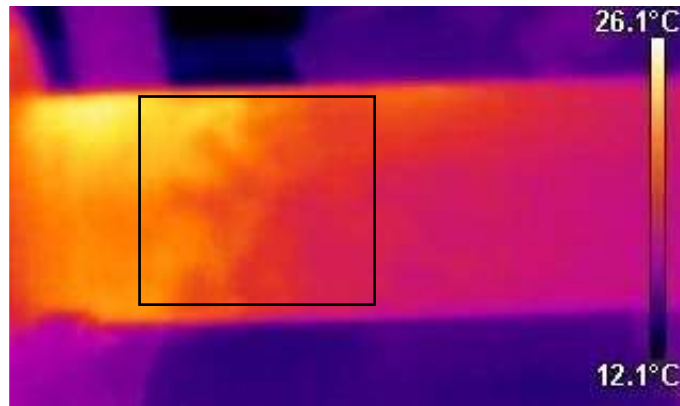


Рисунок 1 – Інфрачервоне теплографічне зображення з виявленими дефектами

Теплографічне зображення з рівномірним температурним градієнтом (рис. 2) свідчить про відсутність локальних затримок прогріву і відсутність дефектів клейового з'єднання.

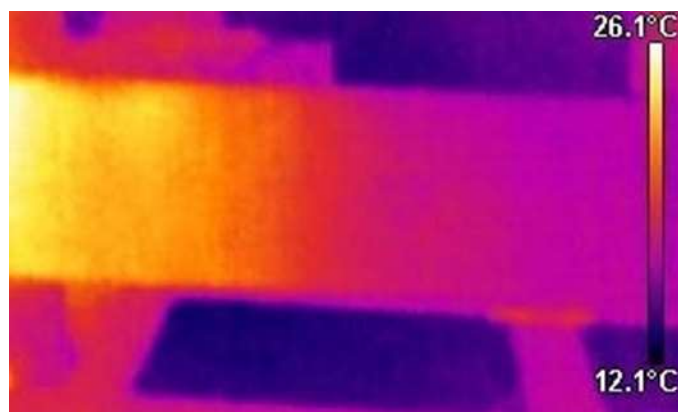


Рисунок 2 – Інфрачервоне теплографічне зображення бездефектного зразку

В обох випадках проводився контроль клейового з'єднання контактним ультразвуковим амплітудно-тіньовий методом, що підтверджував результати інфрачервоного теплографічного методу.

Висновком даної роботи є підтвердження працездатності та раціональності впровадження методу інфрачервоного теплографічного контролю клейових з'єднань, як швидкого методу, що має велике значення для виробництва.

Корисним ефектом є збільшення пропускного об'єму контролю у 8 разів порівняно з контролем тіньовим методом, що є ключовим здобутком наукового впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Waugh, R.C. (2015). Development of infrared techniques for practical defect identification in bonded joints. Springer.
2. Moradi, M. & Safizadeh, M.S. (2019). Edge disbond detection of carbon/epoxy repair patch on aluminum using thermography. Composites Science and Technology, (179), 41-53.
3. Yuwen Qin & Nai-Keng Bao. (1995). Thermographic nondestructive testing (NDT) technique for delaminated defects in composite structures. У Thermosense XVII: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications 2473 (с. 219-223). <https://doi.org/10.1117/12.204858>.



Дронь Микола¹, Дреус Андрій², Дубовик Людмила³

¹професор, доктор технічних наук, професор, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна, e-mail: nord@dnu.dp.ua

²зав. кафедри, доктор технічних наук, професор, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна, e-mail: Dreus.andrii@gmail.com

³старший науковий співробітник, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна, e-mail: dubovik 066@gmail.com

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРІВ ЯК КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ РАКЕТ-НОСІЇВ НАДЛЕГКОГО КЛАСУ

Анотація. Розроблено методику та проведено дослідження міцності полімерного корпусу ракети-носія під впливом навантажень на атмосферній ділянці польоту. Наукова новизна отриманих результатів полягає в обґрунтуванні використання поліолефінів як конструкційних матеріалів для корпусів надлегких ракет-носіїв та пального.

Ключові слова: несучий корпус ракети-носія, поліолефіни, автофажний двигун.

Вступ. У зв'язку з тенденцією мініатюризації супутникових систем різного призначення, що призвело до появи малих космічних апаратів, одним з шляхів зменшення вартості космічних запусків малих космічних апаратів є застосування ракет-носіїв (РН) легкого й надлегкого класів. Перспективним підходом до створення таких РН є використання у якості конструкційного матеріалу для їх корпусів синтетичних полімерів, зокрема, поліолефінів, низька маса, високі технологічні й експлуатаційні характеристики, низькі теплофізичні коефіцієнти та низька вартість яких створюють низку переваг перед традиційними конструкційними матеріалами.

Матеріал і результати досліджень. Проведені дослідження показали що за рахунок відносно високого енергетичного потенціалу полімери можна використати як тверде ракетне паливо шляхом газифікації та спалювання в ракетному двигуні нового типу – автофажному. Обґрунтовано та створено математичну модель і методику розрахунку термогазодинамічних процесів в автофажних двигунах, виконано параметричні дослідження, на підставі яких розроблено рекомендації щодо конструкційних та режимних їх параметрів.

Використання полімерів як основного матеріалу для несучого корпусу РН дозволить як здешевити конструкцію, так і отримати додатковий імпульс та покращити



габаритно-масові характеристики РН внаслідок спалення і зміни маси. Шляхом балістичного проектування й керування траєкторією руху полімерної РН на атмосферній ділянці, можна забезпечити прийнятні навантаження, які забезпечать цілісність конструкції РН в умовах короткотермінового впливу атмосферного потоку.

Вирішення проблеми невизначеності впливу аеродинамічних та теплових потоків, що діють на атмосферній ділянці руху на силовий корпус РН, виготовлений з полімерного матеріалу, і оптимізації траєкторії руху для забезпечення прийнятних теплових та аеродинамічних режимів ракети-носія можливе шляхом фізичного й математичного моделювання та обчислювальних експериментів.

Отримані результати моделювання свідчать про можливість використання поліетилену як основного конструкційного матеріалу корпусу ракети-носія, але за умови використання додаткового теплового захисту. В якості такого теплового захисту рекомендується використовувати тефлонове покриття, яке також є полімерним матеріалом і не призводить до значного підвищення маси РН.

Чисельні експерименти показали, що максимальні теплові потоки при русі в атмосфері мають місце на висотах в діапазоні від 60 км до 100 км і досягають значення $1,2 \cdot 10^4$ Вт/м². При використанні теплозахисного тефлонового покриття температура поверхні корпусу не перевищує значення 100 °С при початковому перевантаженні до 1,2. Враховуючи, що температура плавлення поліетилену становить близько 100 °С, такі теплові режими є цілком допустимими з погляду термостійкості корпусу.

На дозвуковій ділянці польоту верифікація методики числових розрахунків була здійснена шляхом порівняльного аналізу з експериментальними результатами продувок моделей РН в аеродинамічній трубі Т-5 Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, отриманими згідно з розробленою методикою експериментальних досліджень.

Результати сумісного балістичного й теплового розрахунків показали можливість забезпечення прийнятних теплових режимів ракети-носія шляхом вибору певних траєкторій руху.

Застосування розроблених моделей динаміки поступального руху, моделей теплового впливу та міцності дозволять провести оцінки можливості утилізації полімерних корпусів ракет-носіїв на пасивній ділянці траєкторії зі застосуванням комбінованих методів відведення космічних об'єктів з низьких навколосеземних орбіт.

Висновки. Отримані результати досліджень можуть бути використані при проектування легких і надлегких ракет-носіїв з метою вивчення аеродинамічних



характеристик та теплових полів їх корпусів, що дозволить значно здешевити запуск малих космічних апаратів. З використанням ракет-носіїв нового типу відкривається можливість перехоплення небезпечних космічних об'єктів, у тому числі військових супутників, з наступним відведенням залишків та можливих уламків в щільні шари атмосфери з мінімізацією їх падіння на поверхню Землі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dron M., Dreus A., Dubovik L., Kositsyna O. (2023). Innovative Materials and Technologies in Functional Engineering Systems: collective monograph. Technology Center, 110-144. <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-96-1.CH4>
2. M. Dron', E. Lapkhanov, A. Golubek, O. Kositsyna, L. Dubovik (2025). Estimating the degree of disposal of a launch vehicle casing made from polyolefins in the earth's atmosphere. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 1 (133), 33-43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.319437>



Бологін А.С.¹, Давидов О.В.², Тимчук Ю.М.³

¹начальник науково-дослідного управління, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна,

bolas@ukr.net

²начальник, Літаюча авіаційно-технічна лабораторія Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця, Україна, alexavydov69@gmail.com

³заступник начальника, 4993 військове представництво Міністерства оборони України, Одеса, Україна, timab-d1972@ukr.net

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПОЗА МЕЖАМИ ВСТАНОВЛЕНИХ РЕСУРСНИХ ПОКАЗНИКІВ

Наведено комплексний методичний підхід до порядку прийняття управлінських рішень щодо продовження експлуатації літальних апаратів понад встановлені ресурсні показники. Представлено методики та технології продовження строків служби на основі розв'язку актуальних задач механіки складних авіаційних конструкцій. Обґрунтовано доцільність впровадження розглянутої методології до системи прийняття управлінських рішень.

Ключові слова: показники, експлуатація, методика, система прийняття рішень

Вступ. Конструкція літальних апаратів (ЛА) – літаків та вертольотів, які експлуатуються в сучасних умовах у державній авіації України, протягом багатьох років піддається впливу багатьох експлуатаційних факторів – дії атмосферної турбулентності, маневрування у повітрі, руху з великою швидкістю тощо. Вона є складною та відноситься до конструкцій спеціального призначення.

Експлуатація ЛА супроводжується неперервною зміною технічного стану, що призводить до появи пошкоджень і відмов та зниження рівня справності та льотної придатності. Основним змістом заходів, спрямованих на підтримання льотної придатності ЛА є комплекс робіт з технічного обслуговування та ремонту у процесі експлуатації. Ці роботи проводяться за відповідними методиками та технологіями.

Матеріал і результати досліджень

Одним з ключових питань щодо продовження експлуатації авіаційної техніки (АТ), яка залишилася в Україні після розпаду Радянського Союзу, є питання продовження її призначених показників – строків служби та ресурсів (до першого



ремонту, міжремонтних та призначених), літаків та вертольотів, вирішення якого дозволяє суттєво знизити матеріальні та фінансові витрати на підтримку справності та бойової готовності парку ЛА.

Забезпечення цілісності конструкції в процесі вироблення конструкцією ЛА встановлених ресурсних показників пов'язане з поетапним продовженням ресурсів за наробітком та строків служби шляхом виконання відповідних досліджень та робіт. Ці роботи проводяться на підставі: уточнення характеру і умов експлуатації та аналізу історії навантаження конструкції ЛА при застосуванні за призначенням; аналізу надійності парку та досліджень технічного стану однотипних ЛА, що знаходяться в експлуатації; аналізу результатів додаткових досліджень, спрямованих на визначення залишкової міцності та несучої здатності окремих конструктивних елементів.

Об'єктивно ресурси і строки служби ЛА пов'язані з технічним станом силових елементів конструкції планера. Можливості збільшення ресурсних показників старіючої авіаційної техніки реалізуються на основі проведення ресурсних розрахунків із використанням гіпотези лінійного підсумування втомних пошкоджень при обробці даних бортових засобів контролю параметрів польоту, що всебічно досліджено в [1].

Проблемні питання прийняття рішень щодо продовження строків служби старіючих ЛА тільки частково досліджено в роботах по технічній діагностиці, тому існує необхідність розробки таких алгоритмів, технологій, методів, які дозволяють збільшити достовірність та обґрунтованість рішень, які приймає посадова особа для конкретної ситуації продовження строків служби ЛА за результатами дефектування конструкції планера при його оглядах в умовах експлуатуємих частин та авіаційних підприємств.

За останнє десятиріччя розроблено та впроваджено в експлуатацію низку методичних підходів, які реалізовано у вигляді методичних рекомендацій, окремих методик та технологій, що створюють основи прийняття рішень про продовження ресурсних показників та визначають комплекс заходів, спрямованих на забезпечення умов подальшої безпечної експлуатації виробу АТ.

Зокрема, для різних типів ЛА та їх конструктивних елементів розроблено:

Методику прогнозування зміни визначальних узагальнених параметрів технічного стану конструкції літаків типу Су-27 [2];

Методику прогнозування технічного стану силової конструкції літака типу Су-25 з бойовими ураженнями [3];

Методичні рекомендації щодо збільшення ресурсних показників агрегатів шасі літака типу Су-27 [4,5];



Методику оцінювання технічного стану силової конструкції ступок верхнього входу повітрязабірника літаків типу МиГ-29 [6];

Методичні рекомендації щодо можливості подальшої безпечної експлуатації літаків типу Су-25 за межами встановлених показників [7];

Методику формування оптимальних режимів технічного обслуговування літального апарата [8].

Відпрацьована методологія ґрунтується на результатах експертних оцінок, на базі експертних знань, умінь та навичок відповідних фахівців, на набутому досвіді експлуатації, виконаних науково-дослідних робіт та, за своїм змістом, враховує: загальні проблеми механіки, результати досліджень властивостей механічних конструкцій, проблеми міцності та витрати ресурсних показників; результати попередньої експлуатації виробу – застосовану систему експлуатації, історію напручування, аналіз надійності, відмов та дефектів, накопичення пошкоджень, результати розрахунків на міцність, залишок запасів міцності конструкції; особливості конструкції, наявність конструктивно-виробничих та компоновочних недоліків, наслідків експлуатаційних, технологічних та інших факторів, визначення найбільш відповідальних та функціонально значущих елементів конструкції; прогнозування змін технічного стану конструкції, визначення терміну подальшої експлуатації, на який буде забезпечений належний рівень надійності; розроблені на даний час конструктивні та технологічні рішення, які забезпечують надійність виробу; бойові пошкодження, отримані виробом АТ, можливість відновлення та подальшого застосування за призначенням.

На сучасному етапі, у зв'язку з інтенсивним застосуванням ЛА за призначенням та значним старінням авіаційної техніки кількість та обсяг таких методичних інструментів буде збільшуватися. Безперервне зростання кількості інформації та постійне ускладнення завдань, які виконуються старіючим парком АТ, свідчить про необхідність удосконалення існуючих та створення нових інноваційних систем прийняття та ухвалення управлінських рішень. Створювані методичні основи експлуатації ЛА поза межами встановлених ресурсних показників мають увійти до інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (далі – СППР), які здатні реалізувати у режимі реального часу неперервний контрольований процес прийняття рішень у складних ситуаціях, які мають багато складових та характеризуються невизначеністю та несталою структурованістю [9]. СППР може стати основою вітчизняної інформаційно-комунікаційної системи супроводження експлуатації АТ державної авіації України, яка створюється на сучасному етапі як система, що здатна



забезпечити оперативне надходження і обробку інформації та автоматизацію процесів управління надійністю АТ.

Висновок. Використання представленої методології у системі експлуатації літальних апаратів поза межами встановлених ресурсних показників дозволяє забезпечити належний рівень справності та льотної придатності старіючого парку ЛА на сучасному етапі. Перспективою застосування розглянутих у статті та знов створюваних методик є їх впровадження у інтелектуальну СППР для реалізації якісно нового рівня автоматизації управлінських процесів у існуючих системах експлуатації сучасної АТ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабак В.П., Харченко В.П., Максимов В.О. та ін. За ред. Бабака В.П. Безпека авіації. – К.: Техніка, 2004.– 584 с.
2. Добриденко О.М., Бологін А.С., Ковель П.П., Чусь Д.І., Аналіз існуючих методик оцінки технічного стану силових елементів планера літального апарату з використанням методу акустичної емісії, Зб. наук. пр. ДНДІА №10(17), 2014, с.166-174
3. Бологін А.С., Горохов Г.Т. Особливості прогнозування змін встановлених показників планерів повітряних суден, УкрНИИ АТ, Технологические системы №1(74), 2016, с.13-18
4. Добриденко О.М., Ковель П.П., Стрела М.С., Аналіз і порівняння навантажень, що діють на стояк шасі літака типу Су-27 в розрахункових та експлуатаційних умовах, Зб. наук. пр. ДНДІА №13(20), 2017, с.142-148
5. Добриденко О.М., Стрела М.С., Белінська Р.Б. Програмний блок еквівалентного навантаження шасі літака типу Су-27 для різних режимів експлуатації, Зб. наук. пр. ДНДІА №14(21), 2018, с.149-154
6. Добриденко О.М., Стрела М.С., Манулін Ю.О. Побудова моделі та розрахунок на міцність ступки повітрозабірника літака типу МіГ-29, Зб. наук. пр. ДНДІА №14(21), 2018, с.154-160
7. Бологін А.С., Горохов Г.Т. Логіко-статистична модель оцінки довговічності конструкції планера повітряних суден з продовженими призначеними строками служби, УкрНИИ АТ, Технологические системы №3(88), 2019, с.36-40
8. Пащенко С.В., Самулеєв В.В. Застосування методів логічного аналізу при коригуванні програм технічного обслуговування і ремонту старіючого парку військової авіаційної техніки, Зб. наук. пр. ДНДІА №9(16), 2013, с.146-153
9. Герасимов Б.М., Локазюк В.М., Оксіюк О.Г., Поморова О.В. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень. – К.: Видавництво Європейського університету, 2007. – 334 с.



Бологін А.С.¹, Манулін Ю.О.², Горохов Г.Т.³

¹начальник науково-дослідного управління, канд. техн. наук, ст. наук.
співробітник, Державний науково-дослідний інститут авіації, м. Київ, Україна, e-mail: bolas@ukr.net

²начальник науково-дослідного відділу, Державний науково-дослідний інститут авіації, м. Київ, Україна, e-mail: otd12@ukr.net

³провідний науковий співробітник, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник,
Державний науководослідний інститут авіації, м. Київ, Україна, e-mail: otd12@ukr.net

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ПЛАНЕРА СТАРІЮЧИХ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ПІСЛЯ ВИКОНАННЯ КАПІТАЛЬНОГО РЕМОНТУ

На основі результатів статистичного аналізу параметрів оцінки технічного стану планера повітряних суден (ПС), кластерного та регресійного аналізу поточних даних технічного стану парку ПС проведено розрахунок календарного строку експлуатації та ймовірності руйнування авіаційних конструкцій для прогнозу можливості подальшої експлуатації ПС. Досліджено методичні підходи підготовки рішень прогнозу в випадках малого обсягу даних щодо парку ПС.

Ключові слова: планер повітряного судна, ранг пошкодження, прогноз ймовірності руйнування, база даних парку повітряних суден, капітальний ремонт

Вступ. Аналіз основних проблемних питань старіючих ПС показує, що в процесі експлуатації необхідно постійно досліджувати таку важливу властивість конструкції, як довговічність, що визначає здатність силових елементів (СЕ) планерів ПС зберігати експлуатаційну міцність до переходу в граничний стан.

Експлуатаційна міцність - це статична та втомна міцність СЕ при всій сукупності умов експлуатації та збереження ПС, що передбачає здатність конструкції сприймати без руйнування та залишкових деформацій усю сукупність навантажень (аеродинамічних, масових, механічних, теплових і інших), а також вплив корозійних середовищ в умовах регламентованої експлуатації та збереження протягом встановлених ресурсних показників.



Науково-технічна проблема підтримання справності й забезпечення експлуатаційної міцності СЕ потребує використання методичного апарату, який дозволяє забезпечити інформаційну підтримку рішень прогнозу під час капітального ремонту шляхом вирішення завдань:

дослідження впливу експлуатаційних факторів на міцність СЕ і агрегатів планера;
розробки методів визначення втомного строку служби окремих деталей, агрегатів планера та в цілому ПС; встановлення обґрунтованого призначеного ресурсу і календарного строку служби
окремим агрегатам планера та в цілому ПС.

Одним із шляхів вирішення проблеми прогнозу є застосування математичних моделей обробки даних експлуатації, які не могли бути передбачені розробником ПС і виникають під час експлуатації та ремонту ПС.

В результаті виконання капітального ремонту виявляються дефекти, які пов'язані з міцністю від'ємних частин конструкції, кінематичних ланок системи управління, локальні місцеві руйнування: порив обшивки, зрив та зріз заклепок на значних ділянках крила, оперення чи фюзеляжу, зріз болтів кріплення та інше, а також елементів конструкції, що перебувають під високочастотним навантаженням.

Матеріал та результати досліджень.

В якості узагальнюючого показника, що характеризує експлуатаційну міцність вибрано значення рангу пошкодження R_L , яке обчислюється за даними експлуатації й ремонту ПС і відповідає ступеню пошкодження СЕ планера ПС.

В математичній моделі використано функціональні залежності втомних пошкоджень СЕ на основі моделі втомної довговічності – двохпараметричного логарифмічного нормального закону розподілу ймовірності руйнування $\beta_{CE}(t_P)$ [1, с.168]:

$$F(\lg N) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\lg N} e^{-(x-\mu)/(2\sigma^2)} dx, \quad (1)$$

де x - втомна довговічність в кількості циклів N навантажень при лабораторних випробуваннях або кількість годин польоту t_P за даними експлуатації;

μ та σ - параметри функції розподілу (μ - математичне очікування, σ - середнє квадратичне відхилення логарифмів довговічностей, при цьому приймається, що $\sigma = 0,15$ для алюмінієвих сплавів).

Значення ймовірності $\beta_{CE}(t_P)$, яке обчислено згідно (1), дозволяє характеризувати експлуатаційну міцність і встановити відповідне значення рангу пошкодження R_L пропорційно значенню ймовірності $\beta_{CE}(t_P)$.



Для обчислення ймовірності $\beta_{CE}(t_P)$ необхідно задати значення математичного очікування μ , яке невідомо при експлуатації конкретного ПС. Методи технології data mining (інтелектуальний аналіз даних) дозволяють визначити математичне очікування μ шляхом поєднання детермінованих та статистичних результатів обробки баз даних експлуатації ПС.

З метою визначення факторів, які найбільш впливають на зміни технічного стану і які доцільно застосувати під час прогнозу в регресійних залежностях, застосовано метод групового обліку аргументів (МГУА) [2, с. 42].

Застосування алгоритма МГУА з пороговим відбором факторів для лінійних поліномів регресії дозволив визначити п'ять основних факторів, які характеризують поточні значення: фактор ϕ_1 – календарний строк служби t_K ; фактор ϕ_2 – наліт в годинах t_P ; фактор ϕ_3 - кількість капітальних ремонтів N_{KP} , що має чотири дискретних значення 0, 1, 2, 3; фактор ϕ_4 – міжремонтний строк експлуатації t_{POR} ; фактор ϕ_5 - наліт t_R після останнього ремонту.

На основі методів нечіткого логічного аналізу проводиться порівняння поточних значень факторів ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 для досліджуваного ПС зі значеннями факторів ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 стосовно кожного ЛА парку. В результаті визначається перелік ПС в головній групі, які мають випереджальні значення факторів і створюють кластер K1. Перелік інших ПС, які не належать до головної групи, створюють кластер K0.

Методи нечіткого логічного аналізу передбачають формування бази правил системи нечіткого висновку щодо рангу пошкодження R_{II} . Загальна кількість продукційних правил типу “ЯКЩО..., ТО...” складає 14 правил під час використання алгоритма Мамдані. Кількість правил може змінюватися в залежності від допусків, які застосовують експерти під час порівняльного аналізу.

В процесі визначення ПС головної групи можлива поява випадку, коли кількість ПС в головній групі незначна. Вважається, що обсяг вибірки в залежності від необхідної точності розрахунків має бути не меншим $N \geq 30 \div 40$ одиниць [3, с.303].

Тому для збільшення кількості точок до 30 одиниць і підвищення достовірності застосовано метод обробки таблиць з неповними даними SMOTE (Synthetic Minority Over - Sampling Technique) [4].

Метод SMOTE аналітичним шляхом збільшує обсяг вибірки в задачах класифікації. При цьому використано методичний підхід, який базується на припущенні використання поточних даних експлуатації щодо мінімальних та максимальних значень міжконтрольних строків та нальоту ПС кластера K1.



Висновок. Практична реалізація математичної моделі дозволяє науково обґрунтувати можливість встановлення та продовження ресурсних показників ПС за результатами капітального ремонту та додаткових робіт з продовження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стрижиус В.С. Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций.-М.: Машиностроение, 2012 с.
2. Методология, теория, технология и приложения метода группового учета аргументов как метода индуктивного моделирования: спец. вып. // Управляющие системы и машины. – 2003.-.№2. -144 с.
3. Коваленко І.П. Математична статистика у прикладах і задачах. Навчальний посібник. – К.: Видавничий Дім “Слово”, 2012. – 496 с.
4. Shujuan Wang, Yuntao Dai, Jihong Shen, Jingxue Xuan. Research on expansion and classification of imbalanced data based on SMOTE algorithm // Scientific Reports 11, Article number: 24039 (15 december 2021).



Кіпніс Олександр І

*І старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук,
Інститут механіки ім. С.П Тимошенка НАН України, м. Київ, Україна, e-mail:*

a.l.kipnis@gmail.com

ВТРАТА СТІЙКОСТІ ТОНКОЇ ЖОРСТКОЇ ПЛІВКИ НА ПОДАТЛИВІЙ НЕСТИСЛИВІЙ ПІДКЛАДЦІ ПРИ СТИСКУ ВЗДОВЖ МІЖФАЗНОГО ВІДШАРУВАННЯ

Анотація. Визначені критичні деформації, що відповідають механічній нестійкості тонких плівок з матеріалів PEDOT:PSS та P3HT:PCBM, які жорстко з'єднані з достатньо товстою нестисливою підкладкою з матеріалу PDMS, при стиску такої бішарової системи вздовж міжфазного відшарування. Досліджено залежність критичних деформацій від відносної товщини плівки покриття та у випадку відносно коротких відшарувань проведено порівняння одержаних значень критичних деформацій з цими значеннями в аналогічній задачі для такого ж тіла без міжфазного дефекту та зі значеннями, визначеними з використанням відомих наближених формул.

Ключові слова: матеріал з покриттям, відшарування, межа поділу середовищ

Вступ. Якщо кусково-однорідне конструкційне тіло, яке являє собою податливу підкладку, вкриту тонкою жорсткою нано-розмірною плівкою, знаходиться в умовах стиску, то при досягненні величини деформації стиску свого критичного значення відбувається поверхнева втрата стійкості бішару з утворенням хвилеподібного патерну на його поверхні. В літературі таке явище носить назву «wrinkling» (дослівно «зморщування») [1, 2]. При цьому для визначення критичних деформацій, що відповідають поверхневій нестійкості, часто використовують відомі наближені формули [3, 4]. Менш вивченими є питання, пов'язані можливою наявністю дефектів на межі поділу плівки та підкладки, які виникають в процесі експлуатації зразків. Так, внаслідок послаблення адгезії на межі поділу на певній її ділянці можливий розрив суцільності з втратою зв'язку між компонентами бішару. Такий дефект з вільними від напружень берегами можна називати як тріщиною так і відшаруванням. Задачі про стискання тіл вздовж площин розташування тріщин відносять до неklasичних проблем руйнування через неможливість застосувати для такої геометрії навантаження класичні критерії



руйнування. Ефективним методом дослідження неklasичних проблем руйнування є використання апарату лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл [5].

Лінеаризована задача теорії стійкості. В умовах плоскої деформації розглянемо бішар, утворений напівобмеженою підкладкою, з якою жорстко з'єднана тонка плівка покриття товщини h (рис. 1). Межа поділу середовищ 2×0 містить дефект у вигляді відшарування (тріщини) довжини $2a$, береги якого, як і гранична поверхня бішару $2 \times h$ вільні від напружень. Матеріали бішару вважаються вискоеластичними матеріалами, а структура їх пружних потенціалів – довільною.

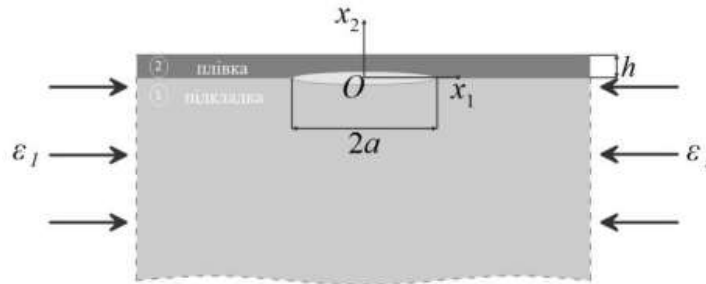


Рис. 1 – система підкладка/тонка плівка при стиску вздовж міжфазного відшарування

На нескінченності матеріали стискаються вздовж осі Ox_1 рівномірно розподіленими навантаженнями таким чином, що забезпечуються однакові укорочення вздовж осі Ox_1 для матеріалів півплощини та смуги. Крайові умови сформульованої задачі записуються наступним чином:

$$\begin{aligned} t_{22}^{(2)} = 0, \quad t_{21}^{(2)} = 0 \quad (x_2 = h, \quad 0 \leq |x_1| < \infty); \\ t_{22}^{(1)} = t_{22}^{(2)}, \quad t_{21}^{(1)} = t_{21}^{(2)} \quad (x_2 = 0, \quad 0 \leq |x_1| < \infty); \\ t_{21}^{(2)} = 0, \quad t_{22}^{(2)} = 0 \quad (x_2 = 0, \quad |x_1| \leq a); \quad u_1^{(1)} = u_1^{(2)}, \quad u_2^{(1)} = u_2^{(2)} \quad (x_2 = 0, \quad |x_1| > a), \end{aligned}$$

де $t_{kl}^{(i)}$, $i, k, l = 1, 2$ – збурення компонент несиметричного тензору напружень Піоли – Кірхгофа $\tilde{t}^{(i)}$; $\vec{u}^{(i)}$ – вектор збурення переміщень; верхні індекси “1” або “2” визначають приналежність величини або функції, відповідно, області “1” або “2”.

Сформульовану задачу лінеаризованої теорії стійкості з використанням загальних представлень розв’язків лінеаризованих рівнянь рівноваги через гармонічні потенціальні функції [5] зведено до задачі на власні значення для системи інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду з деякою додатковою умовою, яка досліджується чисельно з використанням методу Бубнова – Гальоркіна [6].

Числові результати. Розглянемо випадок, коли нестислива PDMS ($E_1 = 2.97$ МПа) підкладка вкрита тонкоплівковими матеріалами PEDOT:PSS ($E_2 = 2000$ МПа, 0.35ν)



або РЗНТ:PCBM ($E_2 = 7300$ МПа, 0.35ν) [2]. Такі бішарові системи представляють собою легкі та міцні матеріали, які широко використовуються, наприклад, при виробництві органічних фотоелектричних сонячних елементів [7]. Нестисливий матеріал підкладки моделюється пружним потенціалом Трелоара [8], а матеріали плівок – стандартним потенціалом гармонічного типу [9].

Залежності критичних деформацій ε_1 від значення геометричного параметру $\lg \beta$, $\beta = h/a$, зображені суцільними кривими на рис. 2. Рисунок 2, а відповідає плівці PEDOT:PSS, а рис. 2 б – плівці РЗНТ:PCBM.

Штрихові прямі на рис. 2 відповідають критичним деформаціям зморщування тонкої плівки на напівобмеженій підкладці у випадку відсутності дефекту. Відповідні лінеаризовані задачі теорії стійкості, які зводяться до розв'язання певного трансцендентного рівняння, розглядаються роботі [10].

Як зазначалося у вступі, оцінку критичних деформацій, що відповідають початку зморщування, можна одержати і з використанням відомої наближеної формули [3, 4]. Цим значенням на рис. 2 відповідають штрих-пунктирні прямі.

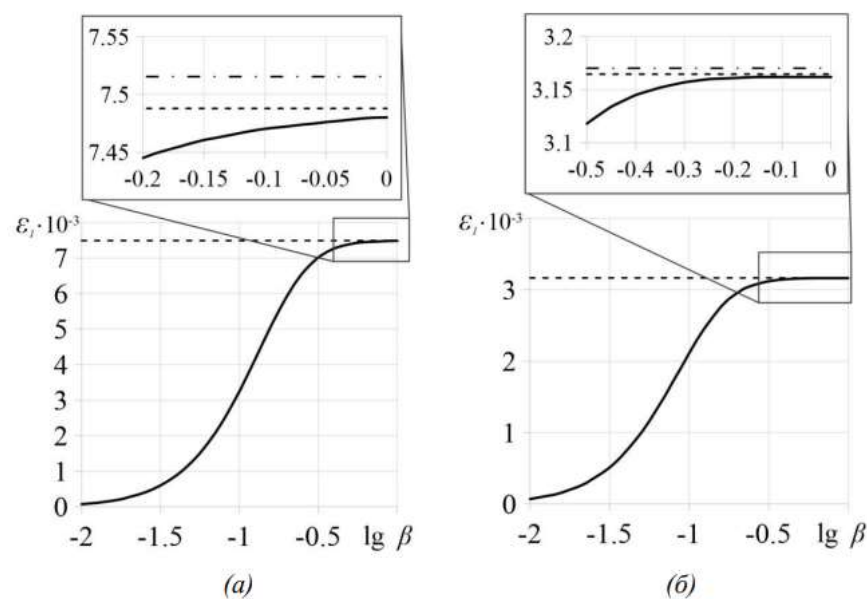


Рис. 2 – критичні деформації втрати стійкості плівки PEDOT:PSS (а) та РЗНТ:PCBM (б)

Висновки. Із застосуванням аналітико-чисельного підходу в рамках лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл вивчено питання впливу наявності міжфазного відшарування на критичні деформації, що відповідають втраті стійкості тонких плівок з матеріалів PEDOT:PSS та РЗНТ:PCBM на PDMS підкладці, товщина якої суттєво більша за товщину плівок. Показано, що для плівок обох типів у випадку ідеального контакту компонентів кусково-однорідного тіла, за наявності відшарування,



довжина якого складає $1/4$ товщини плівки і менше, для оцінки значень критичних деформацій з точністю до 1% можна застосовувати наближені інженерні формули, які не враховують наявності дефектів на межі поділу середовищ і слугують для визначення критичних деформацій початку зморщування тонких плівок на податливих підкладках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Groenewold, J. (2001). Wrinkling of plates coupled with soft elastic media. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 298(1–2), 32–45.
2. Nikraves, S., Ryu, D., & Shen, Y. L. (2020). Instabilities of thin films on a compliant substrate: Direct numerical simulations from surface wrinkling to global buckling. *Scientific Reports*, 10, 5728.
3. Allen, H. G. (1969). *Analysis and design of structural sandwich panels*. Pergamon Press.
4. Mei, H., Landis, C. M., & Huang, R. (2011). Concomitant wrinkling and buckledelamination of elastic thin films on compliant substrates. *Mechanics of Materials*, 43(11), 627–642.
5. Guz, A. N. (1999). *Fundamentals of the Three-Dimensional Theory of Stability of Deformable Bodies*. Springer.
6. Bogdanov, V. L., Nazarenko, V. M., & Kipnis, O. L. (2024). Compression of semibounded body with thin coating layer along interface near-surface crack. Part I. *International Applied Mechanics*, 60(5), 511–524.
7. Kaltenbrunner, M., White, M., Głowacki, E., et al. (2012). Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility. *Nature Communications*, 3, 770.
8. Treloar, L. R. G. (1955). Large elastic deformations in rubber-like materials. In *IUTAM Colloquium* (pp. 208–217).
9. John, F. (1960). Plane strain problems for a perfectly elastic material of harmonic type. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 13(2), 239–296.
10. Bogdanov, V. L., Nazarenko, V. M., & Kipnis, A. L. (2025). Compression of a semi-bounded body with a coating layer along the interface sliding zone. *ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 105(1).



Маланчук Наталія¹, Мартиняк Ростислав²

¹ст.н.с., канд. фіз.-мат. наук, ст.н.с., Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів, Україна, e-mail: natamalachuk@gmail.com

²проф.н.с., доктор фіз.-мат. наук, проф., Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: mrostyslav@gmail.com

КОНТАКТНІ НАПРУЖЕННЯ В ТІЛАХ З ВИЙМКАМИ РІЗНОЇ ФОРМИ ЗА ПОСЛІДОВНОГО ТА ПРОПОРЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕНЬ

Контактній взаємодії пружних тіл із врахуванням фрикційного проковзування та зношування приділяють значну увагу в різних галузях науки, зокрема у трибології, геофізиці, біомеханіці, енергетиці та машинобудуванні. Аналітичні розв'язки таких контактних задач теорії пружності використовують для розрахунку рухомих та нерухомих з'єднань на контактну міцність та фретинг-втому [1, 2].

В умовах плоскої деформації розглянемо два пружні ізотропні півпростори D_1 (нижній) та D_2 (верхній), матеріали яких мають однакові механічні властивості (G – модуль зсуву, ν – коефіцієнт Пуассона). Поверхня верхнього тіла є плоскою, а нижнього на ділянці шириною $2b$ має плитку виїмку (рис. 1), форму якої описує неперервно-диференційована функція

$$r(x) = \begin{cases} -r_0 \left(1 - x^2/b^2\right)^{n+1/2}, & |x| \leq b, \\ 0, & |x| > b, \end{cases}$$

де r_0 – максимальна глибина виїмки ($0 < r_0/b \ll 1$), $n = 1, 2, \dots$ – натуральний параметр.

Тіла контактують під дією рівномірно розподілених на нескінченності нормальних стискальних зусиль P та зсувних зусиль S . Розподіл контактних напружень істотно залежатиме від способу прикладення цих зусиль [3].

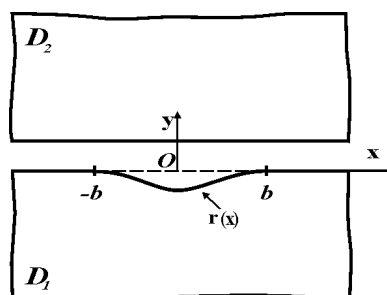


Рисунок 1 – Тіла до контакту



За послідовного навантаження до тіл на безмежності спершу прикладаються монотонно зростальні рівномірно розподілені стискальні зусилля P , а потім – зсувні зусилля S . Якщо стискальні зусилля $P < P_{cls}$, то між тілами відбуватиметься неповний контакт, тобто в межах виїмки виникатиме зазор. При $P \geq P_{cls}$ матимемо повний контакт поверхонь. Тут $P_{cls} = Gr_0(2n+1)(2n-1)!!/2^{n+1}n!(1-\nu)b$ – навантаження, за якого зазор закриється повністю. Для випадку $P \geq P_{cls}$ при $S < S_0$ (тут $S_0 = f(P - P_{cls})$, f – коефіцієнт тертя) відбуватиметься повне зчеплення поверхонь тіл, а при $S_0 \leq S < fP$ відбуватиметься часткове фрикційне проковзування поверхонь на одній ділянці в межах виїмки. За дії зусиль з діапазону $P < P_{cls}$, $0 < S < fP$ поверхні частково проковзуватимуть на двох ділянках, що прилягають до країв зазору. При $S = fP$ починається глобальне ковзання тіл вздовж всієї поверхні спрження і за повного, і за неповного їх контакту.

За пропорційного навантаження до тіл на безмежності одночасно прикладаються монотонно зростальні рівномірно розподілені стискальні зусилля P та зсувні зусилля S такі, що виконується рівність $S = kP$ (k – коефіцієнт пропорційності, $0 < k < f$). Методика дослідження такої контактної взаємодії базується на принципі “защемленої” деформації, згідно з яким попередня поздовжня деформація сконтактованих поверхонь за подальшого простого навантаження не змінюється. Тому відносний зсув поверхонь під навантаженням зростає лише в межах зазору. Після їх входження у контакт за подальшого зменшення зазору цей відносний зсув поверхонь залишається незмінним. Виявлено, що контактні дотичні та нормальні напруження в кожен момент навантаження будуть пропорційні з тим самим коефіцієнтом пропорційності, що і прикладені зовнішні зусилля.

Використовуючи вирази для контактних нормальних σ_x , σ_y і дотичних τ_{xy} напружень, знайдено максимальні дотичні $\tau_{\max}$ та головні нормальні σ_1 напруження на поверхні контакту [4, 5]. Для тіл із крихких матеріалів згідно з першою класичною теорією міцності (критерієм найбільших нормальних напружень) поверхневе руйнування розпочинається за досягнення головними нормальними напруженнями σ_1 межі міцності на розтяг [6]. Для пластичних матеріалів згідно з третьою класичною теорією міцності (критерієм найбільших дотичних напружень) пластична деформація розпочнеться тоді, коли максимальні дотичні напруження $\tau_{\max}$ досягнуть межі текучості матеріалу [6].



Для натурального параметра $n=1$, стискальних зусиль $\bar{P} = P/G = 10^{-3}$, коефіцієнта пропорційності $k=0,05$, коефіцієнта тертя $f=0,1$, коефіцієнта Пуассона $\nu=0,25$, максимальної глибини виїмки $\bar{r}_0 = r_0/b = 10^{-3}$ на рис. 2 зображено розподіл головних нормальних $\bar{\sigma}_1 = \sigma_1/G$ та максимальних дотичних $\bar{\tau}_{\max} = \tau_{\max}/G$ напружень у разі пропорційного (штрихові криві) та послідовного (суцільні криві) навантажень. Обчислення проведено для стискального зусилля $\bar{P} = \bar{P}_{cls}$, за якого зазор повністю закривається.

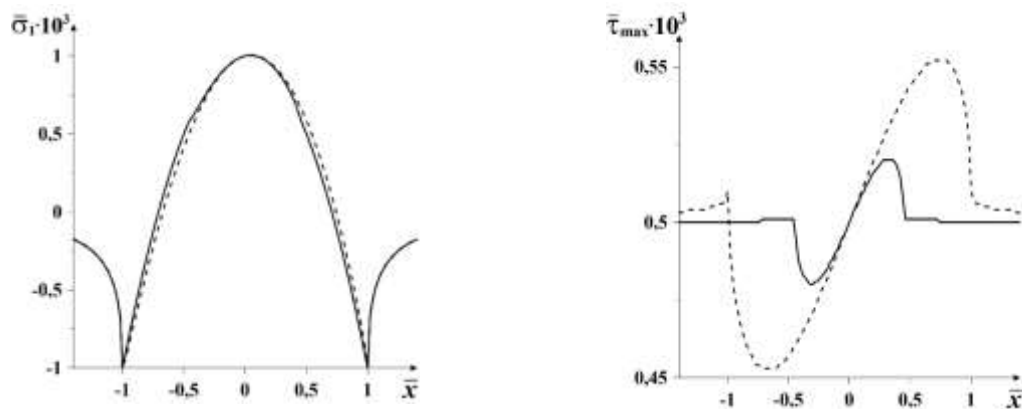


Рисунок 2 – Головні нормальні та максимальні дотичні напруження

Бачимо, що напруження $\bar{\sigma}_1$ розтягувальні в межах виїмки на деякій її центральній ділянці, поза нею – стискальні, а максимального значення вони досягають поблизу центру виїмки. Поза виїмкою ($\bar{x} \geq 1$, $\bar{x} = x/b$) напруження $\bar{\sigma}_1$ у випадку пропорційного і послідовного навантажень співпадають, а в межах виїмки – дещо різняться. За послідовного навантаження напруження $\bar{\tau}_{\max}$ досягають максимуму поблизу правого краю ділянки проковзування, за пропорційного – на ділянці виїмки ближче до її правого краю. Максимальні дотичні напруження за пропорційного навантаження є більшими, ніж за послідовного.

Отже, руйнування крихких матеріалів контактної пари найшвидше розпочнеться поблизу центру виїмки і для пропорційного, і для послідовного навантажень. Для пластичних матеріалів пластичне течіння, найімовірніше, відбуватиметься поблизу правого краю ділянки проковзування за послідовного навантаження, та на виїмці ближче до її правого краю за пропорційного навантаження.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hills D., & Nowell D. (1994). *Mechanics of fretting fatigue*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
2. Дацишин О.П., & Кадира В.М. (2006). Розвиток крайових тріщин під час фретинг-втоми за умов зчеплення/проковзування в контакті між тілами. *Машинознавство*, (3), 9–15.
3. Grinchenko, V.T., & Ulitko, A.F. (2002). The role of the loading history in mechanics of contact interaction allowing for friction in the contact zone. *Mechanics of Solids*, (37), 10–18.
4. Malanchuk N., & Martynyak R. (2012). Contact interaction of two solids with surface groove under proportional loading. *Int. J. Solids Structures*, (49), 3422–3431.
5. Маланчук Н.І. (2013). Контактні напруження в тілах з поверхневою виїмкою за послідовного навантаження. *Прикладні проблеми механіки і математики*, (11), 193–198.
6. Божидарник В.В., & Сулим Г.Т. (1999). *Елементи теорії пластичності та міцності*. В 2-ох т. Т. 2. Львів: Світ.



An Tiancheng¹, Olena Berdnikova², Wu Haitao³

¹ PhD Candidate, Master, Engineer, E.O. Paton Electric Welding Institute,

Kyiv, Ukraine, e-mail: antcinLut@163.com, antiancheng055@gmail.com

² Senior research scientist, Doctor of technical sciences, E.O. Paton Electric Welding

Institute, Kyiv, Ukraine, e-mail: omberdnikova@gmail.com

³ Engineer, Master, Senior Engineer, Harbin turbine company. LTD, Harbin, China,

e-mail: whtlut@126.com

RESEARCH ON LASER CLADDING REPAIR AND ENGINEERING APPLICATION OF HIGH-STRENGTH PRECIPITATION-HARDENING STEEL XM-25

Abstract. XM-25, a high-strength martensitic precipitation-hardening stainless steel used in steam turbine blades, suffers from water erosion. This study restores large XM-25 blades using DED laser cladding. Results show enhanced tensile strength (>1200 MPa), yield strength (>1050 MPa), microhardness (>415 HBW), reduced residual stress, and 95% higher fatigue limit. The cladding layer demonstrates effective precipitation strengthening with uniformly dispersed strengthening phase particles, confirming restoration effectiveness.

Key words: Martensitic, Precipitation hardened, DED, Laser Cladding, Repaire

Introduction. Precipitation-hardened martensitic stainless steels, like 17-4PH, 15-5PH, and 13-8Mo, have gained significant attention due to their high strength, corrosion resistance, and application in industries such as aerospace and power generation. ASME A705_XM-25, a higher-strength alternative, combines elements from 17-4PH and 13-8Mo, offering improved wear and corrosion resistance, making it ideal for demanding applications like steam turbine blades. However, despite its enhanced properties, XM-25 faces issues with surface wear and water erosion, especially in turbine blades exposed to high-speed steam-water mixtures. To address these challenges, laser cladding technologies, such as Directed Energy Deposition (DED), have been explored to restore and enhance the material's surface performance. Laser cladding enables improved wear resistance, reduced thermal deformation, and stronger metallurgical bonds compared to traditional methods. While much research has focused on materials like 17-4PH, limited studies have been conducted on XM-25, highlighting the need for further investigation into its laser cladding performance. This study aims to evaluate the effectiveness of laser cladding on XM-25, using different alloy powders to improve wear



resistance, corrosion resistance, and overall material strength, ultimately offering solutions for turbine blade restoration and surface modification.

Research methods and results:

Table 1. The Chemical Composition of XM-25 Blade and the powders (%)

Material	C	W	O	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb	Al	V	Fe
XM-25 Blade	0.039	0.01	0.016	0.55	0.30	14.62	6.75	1.56	0.68	0.52	0.007	0.061	Bal
XM-25 Powders	0.035	0.01	0.013	0.54	0.30	14.37	6.66	1.56	0.69	0.50	0.014	0.062	Bal

This study investigates the repair of water-eroded low-pressure turbine blades made from XM-25 alloy using Directed Energy Deposition (DED) laser cladding and subsequent aging at 480°C for 4 hours. The repaired blades were tested for mechanical performance, microstructure, and fatigue resistance.

The cladding powder, derived from XM-25 material and processed using vacuum air atomization, was applied using a Trumpf 8000W laser and a KUKA robot. The repaired blades underwent non-destructive testing (PT and RT) to check for defects, revealing no significant macroscopic flaws.

Tensile tests indicated that the tensile strength of the repaired blades exceeded 90% of the base material's strength, and the yield strength improved significantly after aging, meeting engineering requirements. Microhardness testing showed that the cladding layer had higher hardness than the base material, contributing to improved erosion resistance. Metallographic analysis revealed columnar crystals and a precipitation-hardening phase that enhanced the mechanical properties. Fatigue testing demonstrated that the fatigue strength of the repaired blades reached 586.25 MPa, 95% of the base material's fatigue strength, confirming the repair's suitability for engineering applications. Residual stress in the cladding area was approximately 30% of the material's yield strength, indicating minimal deformation. High-cycle fatigue tests further validated the repair's reliability.

Conclusions. DED laser cladding combined with aging treatment is an effective repair method for restoring turbine blades, providing improved mechanical properties, erosion resistance, and fatigue life, ensuring its feasibility for long-term operational use in power plants.

REFERENCES

1. Gao, J., Zhang, Y., He, W., & Li, Y. (2023). Failure study of steam turbine Last-Stage rotor blades under a high-speed wet steam environment. *Engineering Failure Analysis*, 154, 107643. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107643>



2. Wang, L., Zhang, Y., & Liu, X. (2023). Cavitation-erosion behavior of laser cladded low-carbon cobalt-based alloys on 17-4PH stainless steel. *Optics & Laser Technology*, 158, 108761. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108761>
3. Raj, D., Maity, S. R., & Das, B. (2022). State-of-the-art review on laser cladding process as an in-situ repair technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 236(3), 1194-1215. <https://doi.org/10.1177/09544089211044558>
4. Jing, Z., Liu, J., & Wang, Y. (2023). Residual stress release during laser cladding process: A review. *Journal of Laser Applications*, 35(3). <https://doi.org/10.2351/7.0000971>
5. Zhu, L., Chen, H., & Zhang, L. (2021). Recent research and development status of laser cladding: A review. *Optics & Laser Technology*, 138, 106915. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106915>
6. Sabzi, H. E., et al. (2024). Genetic design of precipitation-hardening stainless steels for additive manufacturing. *Acta Materialia*, 274, 120018. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120018>
7. Liu, L., et al. (2024). A heat-resistant steel with excellent high-temperature strength-ductility based on a combination of solid-solution strengthening and precipitation hardening. *Materials Science and Engineering: A*, 915, 147218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147218>
8. Liu, X., et al. (2024). Study on the microstructure, mechanical properties and cavitation erosion resistance of 17-4PH alloy coatings fabricated by high power laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 494, 131451. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131451>



Шульгін Артем ¹, Чемерис Євгеній ², Харченко Володимир ³

¹Начальник науково-дослідного відділу, кандидат технічних наук, старший дослідник, Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна, shulgin2021@gmail.com

²Старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії, доктор філософії, Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна, chemeriis@gmail.com

³Науковий співробітник науково-дослідної лабораторії, аспірант, Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна, kharchenko.vlad@gmail.com

СУЧАСНІ АСПЕКТИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПРАВНОСТІ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Зростаюча кількість завдань з прийняття управлінських рішень щодо забезпечення справності парку авіаційних двигунів літаків-винищувачів та необхідність оперативного їх вирішення обумовлюють потребу створення наукового інструментарію науково-методичного, інформаційного та організаційного забезпечення досліджень і робіт з обґрунтування можливості безпечної експлуатації парку авіаційних двигунів за межами встановлених ресурсних показників та автоматизацію цього процесу. У доповіді наведені основні погляди на шляхи удосконалення існуючого науково-методичного апарату підтримання льотної придатності авіаційних двигунів.

Ключові слова: авіаційний двигун, довговічність, математичне моделювання, інновації.

Експлуатація старіючого парку авіаційних двигунів (далі – АД) за межами встановлених ресурсних показників неможлива без розроблення та обґрунтування відповідних заходів, що дозволять максимально використовувати існуючий потенціал довговічності, який закладено в конструкцію на етапах проектування та виробництва. Дослідження доводять, що зниження потенціалу працездатності складних технічних систем, до яких, відносяться і АД, головним чином, пов'язано з накопиченням незворотних пошкоджень їх елементів. Пошкодження можуть мати механічне, фізичне, хімічне походження або бути їх комбінацією.

Необхідність вирішення проблеми забезпечення справності парку АД літаків-винищувачів в умовах обмеженого бюджетного фінансування, загострюється відсутністю авторського нагляду. Створена та функціонуюча система науково-



технічного забезпечення боєздатності авіації, на сьогодні, забезпечує підтримання справності АД шляхом виконання:

1. контрольно-відновних робіт та переведення на експлуатацію АД за технічним станом;
2. ремонту за технічним станом або середнього ремонту;
3. капітального ремонту;
4. індивідуального продовження встановлених ресурсних показників переважно тієї техніки, яка була відремонтована у попередні роки.

Щодо останнього, світові тенденції розв'язання проблеми забезпечення максимального використання закладених запасів працездатності АД літаків-винищувачів спрямовано на постійне вдосконалення засобів і методів індивідуальної оцінки їх технічного стану на основі поглибленого вивчення і врахування умов навантаження і подальшого аргументованого обґрунтування можливості збільшення (продовження) ресурсу.

Таким чином, подальший розвиток власної системи досліджень і робіт з метою продовження безпечної експлуатації парку АД літаків-винищувачів потребує ретельного вивчення фізичних процесів, що виникають у матеріалах елементів конструкції силових установок. Усвідомлення цих закономірностей дає можливість максимально використовувати усі потенційні ресурсні можливості.

Розробка передових науково-обґрунтованих підходів передбачає застосування власних науково-технічних досягнень, впровадження яких, в першу чергу, акцентовано на технологічну модернізацію оборонної промисловості та розвиток систем інформатизації в експлуатації (системи управління, безперервного інформаційного підтримання життєвого циклу, автоматизованого проєктування, підтримання прийняття рішень, управління даними про об'єкт, штучний інтелект).

Створені методики моніторингу та оцінювання технічного стану елементів АД втілюють математичні моделі, що постійно уточнюються в ході експлуатації [1-3]. Зазначені підходи наукових досліджень ґрунтуються методах системної декомпозиції відокремленням ресурсолімітуючих елементів АД, що забезпечує поглиблене вивчення факторів термомеханічного навантаження та визначення еквівалентної величини пошкодженості. При цьому враховується, що абсолютно кожному циклу навантаження двигуна в процесі польоту, або наземного опробування відповідає певна частка пошкодженості його компонентів, що врешті визначає певну кількісну міру вичерпання ними ресурсу.



На сьогодні проводиться робота узагальнення досвіду застосування зазначених підходів, систематизації отриманих знань та подальшої автоматизації процесів з прийняття управлінських рішень щодо визначення величини можливого збільшення ресурсних показників АД та їх елементів.

При застосуванні ANSYS створено симуляції фізичних процесів, проведено рішення нелінійних і нестационарних просторових задач при заданих граничних умовах, які відповідають впливу експлуатаційних характеристик із урахуванням контактного впливу між елементами та середовищами. Верифікація створених математичних моделей результатами проведеного комплексу експериментальних досліджень забезпечує належне підґрунтя при обґрунтованні приманих рішень щодо подальшої безпечної експлуатації парку АД за межами встановлених ресурсних показників.

Технології 3D-сканування для оперативного синтезу “Digital Twins” (цифрових двійників) реальних елементів АД дозволяють проводити аналіз в контексті приймання рішень, покращити процеси обслуговування, діагностики та прогнозування можливих несправностей. Використання заздалегідь синтезованих “Digital Twins” основних деталей із використанням скриптів на мовах Ansys Parametric Design Language або PythonAnsys дозволяють проводити моделювання в автоматизованому “пакетному” режимі.

Впровадження багатопарових Convolutional Neural Network та Artificial Neural Networks штучних нейронних мереж до підходів для автоматичного виявлення та класифікації пошкоджень за характером і ступенем їх серйозності та прогнозування довговічності забезпечує мінімізацію витрат, враховуючи, що термін експлуатації АД може досягати декількох десятків років, необхідно розуміти, що йдеться не стільки про вартість проведення науково-дослідних робіт і організації серійних закупівель, а швидше про витрати, які забезпечують досягнення військами певного рівня бойових можливостей і підтримки його на усьому планованому періоді експлуатації.

Використання технологій безперервного контролю Condition-Based Monitoring дозволяє визначати потребу в обслуговуванні за фактичними показниками роботи двигуна, а не за заздалегідь визначеними часовими інтервалами. Це дозволяє знизити витрати на обслуговування та підвищити безпеку, оскільки ремонтні роботи виконуються лише за необхідністю.

Таким чином, удосконалення науково-методичного апарату забезпечення справності АД літаків-винищувачів шляхом впровадження сучасних інноваційних рішень може забезпечити оптимізацію технічного обслуговування та підвищення



ефективності використання ресурсного потенціалу з метою підтримання необхідного рівня справності парку АД літаків-винищувачів та бойової готовності екіпажів авіаційних частин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pashchenko, S., Kharchenko, O., Shulhin A., et al. (2022). The Peculiarities of Applying CAD/CAE Systems for the Primary Combustion Chamber Flame Tube Cycle Life Prolongation of the Tactical Military Aircraft Afterburning Turbofan Jet Engine. *Journal of Konbin*, 52(4), 167-176. <https://doi.org/10.2478/jok-2022-0048>.
2. Lobunko, O., Pashchenko, S., V. Samuleev, V., et al. (2021). The Operational Technique for the Major Components of Afterburning Turbofan Engine Rotors. *Збірн. наук. праць ДНДІА*, Вип №17(24). 117-121. <https://doi.org/10.54858/dndia.2021-17-17>.
3. Shulhin, A., Chemerys, Y., Loginov, V., et al. (2024) Numerical Simulation of Workflow for Evaluating Flame Tube Thermocyclic Durability. *Transactions on Aerospace Research*, Sciendo, vol. 2024 no. 2, 33-43. <https://doi.org/10.2478/tar-2024-0010>.



В. В. Хворостяний¹, М. А. Долгов², М. О. Цисар³, В. Є. Бодунов⁴, Р. С. Старинко⁵

¹старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, м. Київ, Україна, plt2002@ukr.net

²провідний науковий співробітник, доктор технічних наук, професор, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, м. Київ, Україна, dna@ipp.kiev.ua

³старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, Інститут надтвердих матеріалів імені В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна, ts_maxim@ukr.net

⁴головний інженер-дослідник, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, м. Київ, Україна, bodunov@i.ua

⁵головний інженер-дослідник, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, м. Київ, Україна, rstarinko@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТОВЩИНИ ЗРАЗКА НА МІЦНІСТЬ ФЛОАТ-СКЛА В УМОВАХ ЧИСТОГО ЗГИНУ

Анотація. Виконано експериментальне дослідження зразків флоат-скла у вигляді плоских пластин різної товщини в умовах чотирьох-точкового згину. Отримана масштабна залежність характеристики міцності від товщини скла. Зроблено висновок, що технологічні процеси виробництва та обробки скляних пластин товщиною 5 та 6 мм дозволяють отримувати елементи конструкцій з більш прогнозованими експлуатаційними властивостями.

Ключові слова: флоат-скло, границя міцності, масштабний ефект, чотирьох-точковий згин.

Вступ. У дослідженнях закономірностей механічної поведінки крихких матеріалів під час експлуатаційних навантажень важливе практичне значення має масштабний (розмірний) ефект, що полягає у зменшенні міцності зразків та елементів конструкцій при збільшенні їх розмірів. В механіці крихкого руйнування масштабним ефектом називають вплив характерного лінійного розміру тіла на його характеристики міцності [1]. Основні його прояви обумовлені впливом структурної неоднорідності конструкційного матеріалу (міцність визначається формою та розмірами найбільш небезпечного включення або зерна), радіуса заокруглення та кута надрізу чи наявності тріщини (при збільшенні поперечного перетину деталі її міцність різко знижується), а



також геометричними параметрами досліджуваних зразків (зокрема зі збільшенням товщини міцність зменшується).

Попри те, що скло традиційно вважається дуже крихким матеріалом та схильним до катастрофічного руйнування, на сьогодні воно широко використовується для створення несівних елементів конструкцій на будівництві, транспорті, машинобудуванні тощо. Постійне вдосконалення технологій виготовлення та обробки крихких матеріалів типу силікатного скла, що супроводжується розвитком наукових положень експериментально-теоретичного обґрунтування конструкційної міцності, з одного боку значно розширює сфери практичного застосування, а з іншого – зумовлює необхідність періодичного контролю і супроводу з визначенням їх механічного стану, рівня пошкоджуваності, терміну роботоздатності та ресурсу.

Метою наведеного дослідження є визначення характеру впливу товщини зразка, виконаного у вигляді плоскої пластини, на величину міцності флоат-скла в умовах чотирьох-точкового згину.

Матеріал і результати досліджень. Об'єктом дослідження було звичайне силікатне скло технічного призначення, що виготовлене за флоат-технологією і містить 70 – 75 % діоксиду кремнію. Використовували скло вітчизняного підприємства-виробника у стані постачання без додаткових операцій механічної обробки. Для випробувань підготовлено зразки типу пластин різної товщини. Загалом досліджували чотири групи зразків, у яких відносно товщини інші геометричні розміри пропорційно змінювалися (Табл. 1). Порівняння найменших та найбільших за розмірами зразків показує відмінності в 2 – 4 рази. Обсяг кожної групи складав не менше 19 зразків. Скляні пластини випробовували в умовах чотирьох-точкового згину на атестованій гідравлічній установці ZD-4 (Німеччина), обладнаній універсальною вимірювальною системою GT-12-M18 та програмним забезпеченням «GlassBend» [2]. Відповідно до типорозмірів зразків застосовували експериментальне обладнання з різними відстанями між опорними та навантажувальними роликami (Табл. 1). Слід зазначити, що у всіх експериментах різана кромка досліджуваного зразка, що є найбільш дефектною, розташовувалася в області напружень розтягу.



Таблиця 1 – Геометричні розміри різних груп зразків та параметри експериментального устаткування

№ групи	Розміри зразка, мм			Відстань між роликами при чотирьох-точковому згині, мм	
	Довжина	Ширина	Товщина		
	L	W	h	$l_{\text{навант.}}$	$l_{\text{опорн.}}$
1	150	50	3,85	50	100
2	270	100	5,10	100	200
3	300	100	6,00	100	200
4	500	200	8,20	150	300

Під час досліджень за допомогою програмного забезпечення «GlassBend» керували процесами вимірювання та накопичення експериментальних даних в реальному часі у вигляді графічних залежностей прогину та деформації пластини скла від величини прикладеного зусилля. Завдяки застосованій схемі випробувань на зразку між навантажувальними роликами наявна ділянка чистого згину, на якій з найбільш небезпечного дефекту зароджується магістральна тріщина, що поширюючись, призводить до руйнування скла. Під час фрактографічних досліджень зламів зразків спостерігали розташування фокуса зламу (осередку руйнування) саме на ділянці чистого згину. Таким чином реалізується перевага цієї схеми навантаження, що забезпечує отримання більш надійних експериментальних результатів і відсутності відбракування некоректних дослідів. Для порівняння можна навести літературні дані випробувань пластин скла при осесиметричному згині, що демонстрували численні випадки руйнувань поза зоною навантаження з максимальними головними напруженнями (близько 19% від загальної кількості 393 дослідів) [3]. За даними проведених випробувань побудована діаграма залежності границі міцності флоат-скла від товщини зразка, що засвідчила прояв прямого масштабного ефекту (рис. 1).

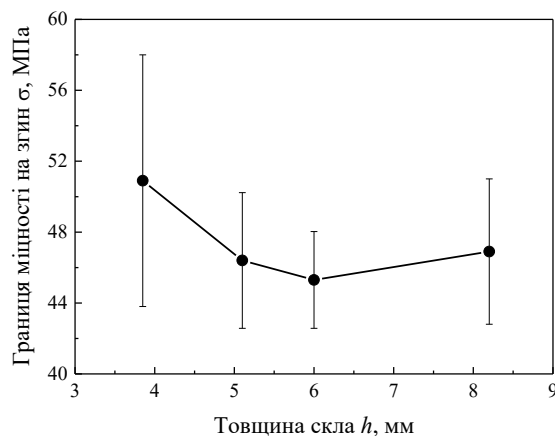


Рисунок 1 – Масштабна залежність міцності флоат-скла від товщини зразка



Висновки. Було встановлено, що зі збільшенням товщини зразка флоат-скла його міцність зменшується. Показано, що при цьому розкид емпіричних даних також зменшується. Це є свідченням, що технології виготовлення та обробки скла товщиною 5 та 6 мм є найбільш розробленими та досконалими для отримання якісних виробів. Таке скло характеризується найбільш стабільними, відтворюваними та прогнозованими характеристиками міцності з найменшим розкидом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Черепанов Г. П. (1974). Механика хрупкого разрушения. Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы.
2. Родичев Ю. М., Сорока Е. Б., Дроздов А. В., Хворостяный В. В., Бодунов В. Е. (2020). Повышение точности измерения деформаций и перемещений стеклянных пластин при изгибе с использованием измерительной системы GT-12-M8. В збірнику тез доповідей VII міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (с. 296 – 300).
3. Castori G., Speranzini E. (2019). Fracture strength prediction of float glass: The coaxial double ring test method. Construction and Building Materials, (225), 1064 – 1076.



Білова Оксана

Доцент, канд. фіз-мат наук, кафедра економічної інформатики УДУНТ, Дніпро,
Україна e-mail: okbilova@gmail.com

АСИМПТОТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ У ВУЗЛІ З'ЄДНАННЯ ЛОПАТЕЙ ВІТРЯКА ДО ХАБУ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Ефективність і довговічність вітроенергетичних установок значною мірою залежать від конструктивних рішень та надійності їхніх з'єднань. Одним із ключових елементів є контактна взаємодія між хабом і лопаттю.

У цій роботі розглядається застосування методу збурення [1, 2] для дослідження механічної взаємодії хабу з композиційного матеріалу та лопаті вітряної турбіни. Результати можуть бути корисними для підвищення надійності та оптимізації конструкції вітроенергетичних систем.

Ключові слова: асимптотичний аналіз, метод збурень, математична модель, анізотропна пластина, криволінійна анізотропія., вітряк, лопаті, хаб, болт

Вступ. Розв'язання контактної задачі для ортотропної пластини з циліндричною анізотропією та стрингера при їх жорсткому контакті отримано автором аналітично асимптотичним методом Маневича-Павленка може застосовуватись в різних практичних задачах цивільного будівництва, судобудівництва та інш. В даній статті вперше розберемо застосування результатів цього розв'язку для дослідження контакту деяких елементів конструкції вітряка. Розглядається контактна взаємодія лопатей та хабу з композиційного матеріалу, які з'єднуються за допомогою болтів. Хаб вітряка – це центральна частина, до якої кріпляться лопаті. Його міцність і вага критично впливають на ефективність та довговічність вітроустановки. У сучасних вітротурбінах кріплення лопатей до хаба виконується за допомогою високоміцних болтів, оскільки це дозволяє забезпечити надійність і можливість технічного обслуговування. Місця кріплення лопатей до хабів – це дуже важливий елемент конструкцій. Щоб не втратити енергію в таких вузлах, щоб полегшити вагу конструкції, її міцність та терміни придатності треба вивчати механічні властивості їх взаємодії (розтяг, зсув, напруження в зоні контакту) та шукати нові матеріали елементів конструкцій, які дозволять зекономити.

Матеріал і результати досліджень. Основні типи кріплення лопатей до хабу за допомогою болтів – це, по-перше, кільцевий фланцевий монтаж – лопать має фланець,



який кріпиться до хабу через болтові з'єднання. Використовується у великих турбінах (2+ МВт). Головна перевага – рівномірний розподіл навантаження. Ще активно застосовуються вставні болтові з'єднання (Insert-type connection). Болти загвинчуються у вставні металеві втулки, інтегровані у кореневу частину лопаті. Менше навантаження на окремі точки кріплення. Традиційно хаби виготовляються зі сталей або чавуну з високими характеристиками міцності. Однак через велику вагу цих матеріалів зростає навантаження на несучі елементи вітроустановки, що впливає на загальну ефективність системи. Перевага композиційних матеріалів це низька вага, корозійна стійкість – особливо важливо для офшорних (морських) вітряків.



Рисунок 1-Конструкція вузла.

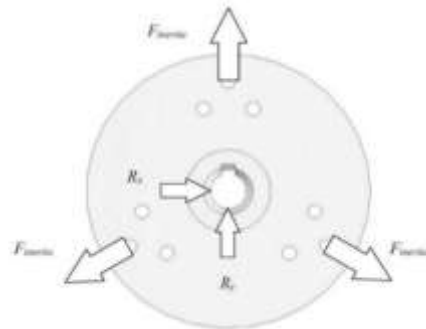


Рисунок 2-Навантаження на хаб.

Хаби, що виготовляються з композиційних матеріалів (полімерні композити, армовані вуглецевим або скляним волокном) поки що рідкість на сьогодні, тільки переважно в експериментальних або малих турбінах, але мають деякі переваги і це треба досліджувати.

Розглянемо модельну задачу контактної взаємодії жорсткого хабу та лопаті вітрогенератора, яка виготовлена з композиційного матеріалу з циліндричною анізотропією. Це означає, що механічні властивості матеріалу змінюються залежно від кута та радіального положення, що характерно для шаруватих або намотаних композитів. Болт вважається абсолютно жорстким. До нього прикладено зовнішнє зусилля, що може включати осьову силу, згинальний момент або комбінацію навантажень. Хаб виготовлений з композитного матеріалу, механічні властивості якого змінюються в залежності від радіальної координати та кута (циліндрична анізотропія). Контакт між хабом і болтом жорсткий. Контактний тиск буде неоднорідним через анізотропію



матеріалу. Тобто, постановка задачі буде ідентична наступній задачі про передачу навантаження від стержня до ортотропної пластини з циліндричною анізотропією, що має вигляд кільцевого сектора (рис.3). Пружна пластина $R_0 \leq r < \infty$, $-\gamma \leq \theta \leq \gamma$ закріплена по кромках $\theta = \pm\gamma$. на нескінченності напруження і переміщення відсутні. Уздовж серединного радіусу ($\theta = 0$) пластина посилена стержнем, який в граничній точці $r = R_0$ навантажений подовжнім зусиллям P_0 (в цій задачі напрям розглядався протилежним до напрямку тиску болта на хаб).

Вважається, що $0 \leq \xi \leq h$, $h = \ln R_1/R_0$; ($R_0 \leq r \leq R_1$); $0 \leq \eta \leq \gamma$.

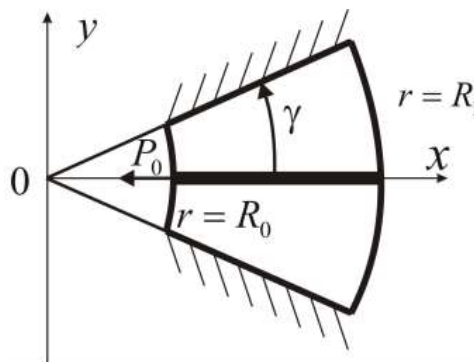


Рисунок 3.

Ця задача зводиться до інтегрування рівнянь рівноваги пластини в переміщеннях

$$\begin{cases} B_1 u_{\xi\xi} + G u_{\eta\eta} - B_2 (v_\eta + u) + G m v_{\xi\eta} - G v_\eta = 0, \\ G v_{\xi\xi} + B_2 v_{\eta\eta} + B_2 u_\eta + G m u_{\xi\eta} + G (u_\eta - v) = 0; \end{cases} \quad (1)$$

за таких граничних умов:

$$\begin{aligned} \sigma_1 = B_1 (R_0 e^\xi)^{-1} (u_\xi + \mathfrak{G}_2 (v_\eta + u)) = 0, \tau = G (R_0 e^\xi)^{-1} (u_\eta + v_\xi - v) = 0 \quad (\xi = 0, \xi = h), \\ u = u_\xi, v = 0 \quad (\eta = 0); u = v = 0 \quad (\eta = \pm\gamma). \end{aligned} \quad (2)$$

Переміщення стержня u_c задовольняє співвідношенню

$$E I u_{c,\xi\xi} - P_0 R_0 e^\xi \delta(\xi) - 2 R_0 e^\xi \tau(\xi, 0), \quad (3)$$

а контактне зусилля взаємодії між стержнем і пластиною визначається формулою (4).

$$T(\xi) = \tau(\xi, 0) = G (R_0 e^\xi)^{-1} u_\eta|_{\eta=0}. \quad (4)$$

У першому наближенні для даної задачі НДС першого типу має вигляд (напружений стан першого типу)



$$B_1 u_{\xi\xi}^{1,0} + G u_{\eta\eta}^{1,0} = 0, \quad (5)$$

$$v_{\eta}^{1,0} + u^{1,0} = 0. \quad (6)$$

$$\text{з граничними умовами} \quad u^{1,0} = u_c (\eta = 0); \quad u^{1,0} = 0 (\eta = \gamma). \quad (7)$$

Рівняння, які відповідають НДС другого типу мають

$$\text{вигляд} \quad G v_{\xi\xi}^{2,0} + B_2 v_{\eta\eta}^{2,0} = 0, \quad u_{\xi\xi}^{2,0} = 0, \quad (8)$$

за таких граничних умов:

$$v_{\xi}^{2,0} = -u_{\eta}^{1,0} (\xi = 0; \xi = h), \quad v^{2,0} = -v^{1,0} (\eta = 0; \eta = \gamma) \quad (9)$$

Для НДС першого типу одержано компоненти вектора переміщень

$$u^{1,0}(\xi, \eta) = -\frac{P_0 R_0}{EF} \frac{\omega(\gamma - \eta)}{gh} - \frac{2P_0 R_0}{EFh} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f(n, \eta) \cos(\alpha_n \xi)}{\varphi(n)}, \quad (10)$$

$$v^{1,0}(\xi, \eta) = -\frac{P_0 R_0}{EF} \frac{\omega(\gamma - \eta)^2}{gh} - \frac{2P_0 R_0}{\omega EFh} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_1(n, \eta) \cos(\alpha_n \xi)}{\alpha_n \varphi(n)}, \quad (11)$$

$$\text{де } \alpha_n = n\pi/h; \quad f(n, \eta) = sh[\omega \alpha_n (\gamma - \eta)] / sh(\omega \alpha_n \gamma); \quad g = 2G\omega / (EF),$$

$$f_1(n, \eta) = ch[\omega \alpha_n (\gamma - \eta)] / sh(\omega \alpha_n \gamma); \quad \omega = (B_1 / G)^{1/2}; \quad \varphi(n) = \alpha_n^2 + g \alpha_n cth(\omega \alpha_n \gamma).$$

$$v^{1,0}(\xi, 0) = -\frac{P_0 R_0}{EF} \frac{\omega \gamma^2}{2gh} - \frac{2P_0 R_0}{EF} \frac{h^2}{\omega \pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{cth(\omega \alpha_n \gamma) \cos(\alpha_n \xi)}{n^2 [n + g(h/\pi) cth(\omega \alpha_n \gamma)]},$$

$$v^{1,0}(\xi, \gamma) = -\frac{2P_0 R_0}{EF} \frac{h^2}{\omega \pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(\alpha_n \xi)}{n^2 sh(\omega \alpha_n \gamma) [n + g(h/\pi) cth(\omega \alpha_n \gamma)]}$$

Отримані розв'язки не задовольняють нульовим граничним умовам за дотичним напруженням τ для пластини при $\xi = 0$ і $\xi = h$, а також нульовим граничним умовам за компонентою вектора переміщень v при $\eta = 0$ и $\eta = \gamma$. Усунення відповідних нев'язок забезпечується розв'язанням крайової задачі другого типу НДС. Треба зауважити, що розв'язки для зусилля контактної взаємодії, одержані асимптотичним методом, справедливі всюди, крім безпосереднього околу точок $\xi = 0, \eta = 0$ та $\xi = 0, \eta = \gamma$, де потрібно використовувати особливий розв'язок $\tau(x) = Ax^{-1}$. Невідомий постійний коефіцієнт A знаходиться з умов «зрощування» (в деякій точці співпадають як особливий та наближений розв'язки, так і їх похідні). Ці умови дозволяють визначити точку зрощування двох розв'язків та константу особливого. Показано, що зона, в якій необхідно використовувати особливий розв'язок, незначна. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції з'єднання хабу і лопаті та



прогнозування довговічності матеріалу. Одержані на основі запропонованого підходу значення для контактних напружень разом з особливим розв'язком дають рівномірно придатний в усій області контакту наближений розв'язок задачі для ефективного дослідження картини контактної взаємодії зазначених елементів конструкції сучасного вітряка.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Манєвіч Л. І. & Л. І. Манєвіч, А. В. Павленко, С. Г. Коблік (1982). Асимптотические методы в теории упругости ортотропного тела /- К., Донецк: Вища школа, 152 с.
2. Кагадій Т.С. Шпорта А.Г., Білова О.В., Щербина І.В. (2021) 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>
3. Kahadii, T.S., Shporta, A.H., Bilova, O.V., & Shcherbyna, I.V. (2020). Napruzhenodeformovanyi stan sharuvatoi osnovy z pidkripliuiuchym elementom. Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia. KhNTU. 3 (2.1), 107-116.
4. Redchyts D., Fernandez-Gamiz U., Tarasov S., Tarasov A., Moiseienko S. Comparison of aerodynamics of vertical-axis wind turbine with single and combine Darrieus and Savonius rotors.
5. Redchyts D., Portal-Porras K., Tarasov S., Moiseienko S., Tuchyna U., Starun N., Fernandez-Gamiz U. (2023) Aerodynamic Performance of Vertical-Axis Wind Turbines. Journal of Marine Science and Engineering. Vol. 11(7):1367. P. 1-16. <https://doi.org/10.3390/jmse11071367> (Scopus, Q2).
6. Dovgyi S., Moiseienko S., Polevoy O., Redchyts D., Tarasov S. (2024). Mathematical modelling of vertical-axis wind turbines rotors aerodynamics. Topical Problems of Fluid Mechanics 2024, Prague, 2024. P. 31-37. <https://doi.org/10.14311/TPFM.2024.005> (Web of Science).
7. Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков (2015) Основи вітроенергетики: підручник /; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.



Золотаренко Сергій¹, Алексєєнко Сергій²

¹аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail: zolotarenko.s.an@nmu.one

²професор кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail: aleksieienko.s.v@nmu.one

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗНИЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ШУМУ ЛОПАТЕЙ ВІТРОВИХ ТУРБІН

Анотація. Аеродинамічний шум, що його генерують лопаті вітрових турбін, є основним чинником, який обмежує їхнє використання поблизу житлових забудов. У роботі розглянуто відомі наявні методи зниження шуму, зокрема пасивні, такі як модифікація профілю та текстуровані покриття, та активні, зокрема контроль примежового шару та адаптивні профілі. Наведено результати чисельних та експериментальних досліджень ефективності цих технологій.

Ключові слова: аеродинамічний шум; вітрові турбіни; пасивні та активні методи шумозниження; турбулентність; аероакустичні характеристики.

Вступ. Аеродинамічний шум, що його генерують лопаті малих та середніх вітряних турбін, є суттєвою проблемою, яка обмежує більш широке впровадження вітрових технологій, зокрема використання вітряків поблизу житлових забудов. Основними джерелами аеродинамічного шуму є турбулентність примежового шару, нестабільності потоку навколо обтічної поверхні, а також вихороутворення із подальшою взаємодією із задньою крайкою лопаті. Дослідження цих механізмів є основою для розробки ефективних методів зменшення шуму та покращення аероакустичних характеристик вітрових турбін.

Аналіз відомих результатів досліджень демонструє, що наявні методи зниження аеродинамічного шуму можна поділити на дві основні категорії: пасивні та активні. Пасивні методи передбачають конструктивні зміни, які зменшують генерацію шуму без додаткових енергетичних витрат. Активні методи, навпаки, використовують динамічні технології, що змінюють характеристики потоку в реальному часі. У роботі розглянуто та проаналізовано ефективність наявних підходів для зниження аеродинамічного шуму на основі чисельних та експериментальних досліджень.



Матеріал і результати досліджень. Одними з найбільш популярних відомих пасивних методів зниження шуму є модифікація геометрії задньої крайки лопаті, такі як застосування зазубрених структур [1-3], пористих, сітчастих [4], гнучких [5, 6], щілинних [7] щіткоподібних з подовженням [8, 9], а також використання мікроструктурованих покриттів [10] та зміненої форми профілю [11].

Дослідження показують, що зазубрені задні крайки сприяють зменшенню інтенсивності вихороутворення, що дозволяє знизити рівень шуму на 3–6 дБ залежно від конфігурації. Оптимізація параметрів зазубрин, таких як довжина хвилі та кут нахилу, дозволяє отримати додаткові акустичні переваги, зменшуючи шум ще на 1–2 дБ. Дослідження біонічних текстурованих покриттів, натхнених шкірою акули [12], демонструють їхню ефективність у зниженні турбулентності примежового шару, що сприяє зменшенню шуму на 2–4 дБ.

Ще одним перспективним підходом є зміна форми профілю лопаті. Використання профілів зі змінною кривизною задньої крайки або впровадження пористих структур суттєво зменшує низькочастотний шум, що виникає через вихорові структури в зоні відриву потоку, що дає змогу досягти зниження шуму на 4–7 дБ залежно від геометрії профілю. Експериментальні дослідження підтверджують ефективність цих рішень у широкому діапазоні робочих режимів [13].

Прикладами активних методів зниження є спроба контролю примежового шару за допомогою вдування повітря в область задньої крайки [7] та використання адаптивних профілів, що змінюють свою геометрію залежно від аеродинамічних умов [5, 6]. Вдування повітря у вихровий слід за задньою крайкою дозволяє знизити інтенсивність турбулентних флуктуацій, що призводить до зменшення шуму на 5–8 дБ. Адаптивні профілі, що змінюють свою геометрію в реальному часі, демонструють значний потенціал у підвищенні аеродинамічної ефективності лопатей вітрових турбін та зменшенні шумових характеристик на 6–10 дБ залежно від режиму роботи. Новітні конструкції, такі як SCAMORSA-1, показують зниження аеродинамічного опору та покращення співвідношення підйомної сили до опору, що сприяє як енергетичній ефективності, так і зменшенню акустичного впливу. Чисельні моделювання та експериментальні дослідження підтверджують ефективність цих підходів за різних режимів обтікання [5].

Аналіз ефективності сучасних методів зниження аеродинамічного шуму вітрових турбін показує, що як пасивні, так і активні підходи мають свої переваги та обмеження. Пасивні методи дозволяють значною мірою зменшити шумове випромінювання без



додаткових енергетичних витрат, але їхня ефективність обмежена геометричними параметрами лопаті та умовами експлуатації. Водночас активні методи демонструють більш гнучкий підхід до зниження шуму, забезпечуючи динамічну зміну характеристик потоку, що може бути особливо ефективним у змінних аеродинамічних умовах.

Попри досягнуті успіхи, залишається низка викликів, пов'язаних із впровадженням цих технологій у промислове використання. Зокрема, активні методи потребують додаткових енергетичних ресурсів і складних керувальних систем, що ускладнює їхнє масштабування до великих вітроустановок. Крім того, оптимізація пасивних методів потребує подальших досліджень для досягнення максимальної ефективності шумозниження без погіршення аеродинамічних характеристик лопатей.

До того ж перспективним напрямом можна вважати дослідження комбінованих підходів, які поєднують переваги пасивних і активних методів, забезпечуючи як структурну оптимізацію лопатей, так і динамічний контроль потоку. Впровадження таких технологій може сприяти значному зменшенню шумового впливу вітрових турбін, що є критично важливим для їхнього розміщення поблизу населених пунктів та подальшого розвитку вітроенергетики.

Висновки. Проблема аеродинамічного шуму малих та середніх вітрових турбін залишається актуальною, оскільки наявні технології все ще не дозволяють істотно знизити рівень шумового випромінювання, необхідного для умов експлуатації поблизу житлових забудов. Аналіз наявних підходів показує, що пасивні методи, такі як модифікація геометрії задньої крайки, застосування біонічних текстурованих покриттів та зміна форми профілю, можуть зменшувати рівень шуму на 3–7 дБ залежно від конфігурації. Активні методи, зокрема контроль примежового шару за допомогою вдування повітря та використання адаптивних профілів, дозволяють додатково знизити шум ще на 5–10 дБ, але вимагають енергетичних витрат і складних керуючих систем. Чисельні моделювання та експериментальні дослідження підтверджують ефективність цих технологій, проте їхнє застосування потребує подальшої оптимізації для застосування на реальних конструкціях вітрових турбін. Подальший розвиток цих підходів є необхідним для досягнення прийняттого рівня шуму, що сприятиме ширшому впровадженню вітроенергетики в умовах суворих екологічних та акустичних обмежень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cao, H., Zhang, M., Zhang, Y., & Zhou, T. (2021). A general model for trailing edge serrations simulation on wind turbine airfoils. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 11(4), 100284. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2021.100284>



2. Santamaria, J., Bierrenbach-Lima, A., Sanjosé, M., & Moreau, S. (2024). Shape considerations for the design of propellers with trailing edge serrations. *Journal of Sound and Vibration*, 118771. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118771>
3. Juknevicius, A., & Chong, T. P. (2018). On the leading edge noise and aerodynamics of thin aerofoil subjected to the straight and curved serrations. *Journal of Sound and Vibration*, 425, 324–343. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.02.038>
4. Jiang, C., Moreau, D., de Silva, C., & Doolan, C. (2023). Noise generation mechanisms of a micro-tube porous trailing edge. *Journal of Sound and Vibration*, 118085. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118085>
5. Bishay, P. L., McKinney, T., Kline, G., Manzo, M., Parian, A., Bakhshi, D., Langwald, A., Ortega, A., Gagnon, M., & Alfaro, G. F. (2024). SCAMORSA-1: a cambermorphing wind turbine blade with sliding composite skin. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.04.006>
6. Khani Aminjan, K., Ghodrat, M., Heidari, M., Rahmanivahid, P., Naghdi Khanachah, S., Chitt, M., & Escobedo-Diaz, J. P. (2023). Numerical and experimental investigation to design a novel morphing airfoil for performance optimization. *Propulsion and Power Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2023.02.004>
7. Jaffar, H. M., Al-Sadawi, L. A., Khudhair, A. A., & Biedermann, T. (2022). Aerodynamics Improvement of DU97-W-300 Wind Turbine Flat-Back Airfoil Using Slot-Induced Air Jet. *International Journal of Thermofluids*, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100267>
8. Finez A, Jondeau E, Roger M, Jacob M C (2010) Broadband noise reduction with trailing edge brushes. 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Stockholm, Sweden, AIAA-paper 2010-3980
9. Herr M (2007) Design criteria for low-noise trailing edges. 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Rome, Italy, AIAA-paper 2007-3470
10. Wang, L., Wang, C., Wang, S., Qin, S., Sun, G., You, B., & Zhong, Y. (2021). A boundary surrogate model for micro/nano grooved surface structure applied in turbulence flow control over airfoil. *Chinese Journal of Aeronautics*. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.04.026>
11. Mar Aye, C., Wansaseub, K., Kumar, S., G. Tejani, G., Bureerat, S., R. Yildiz, A., & Pholdee, N. (2023). Airfoil shape optimisation using a multi-fidelity surrogate-assisted metaheuristic with a new multi-objective infill sampling technique. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 1–18. <https://doi.org/10.32604/cmes.2023.028632>



12. Fu, Y. F., Yuan, C. Q., & Bai, X. Q. (2017). Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces. *Biosurface and Biotribology*, 3(1), 11–24.
<https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2017.02.001>
13. Rubio Carpio, A., Avallone, F., Ragni, D., Snellen, M., & van der Zwaag, S. (2020). Quantitative criteria to design optimal permeable trailing edges for noise abatement. *Journal of Sound and Vibration*, 485, 115596.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115596>



Алексєєнко Сергій¹, Сазанішвілі Зоя², Некрасов Валерій³

¹професор кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, д.т.н., професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: aleksieienko.s.v@nmu.one

²доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, к.т.н., доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: sazanishvili.z.v@nmu.one

³асистент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: nekrasov.v.ye@nmu.one

ВПЛИВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НА РОБОТУ МАЛИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Анотація. У дослідженні розглянуто вплив метеорологічних умов на обледеніння малих безпілотних літальних апаратів масою 15–150 кг. Аналізуються ризики утворення льоду на висотах до 1000 м, особливо в шаруватих і купчастих хмарах за температур від 0°C до -20°C. Оцінюються параметри LWC, MED та коригувальні коефіцієнти для прогнозування обмерзання й забезпечення надійності БПЛА під час польоту.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, обледеніння, метеорологічні умови, вологість, середній ефективний діаметр капель.

Вступ. Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у гуманітарній, комерційній та військовій сферах зростає, що вимагає досліджень для підвищення їхньої ефективності та надійності. Особливо важливо забезпечити їхню стабільну роботу в складних метеоумовах, зокрема за низьких температур і високої вологості. Обледеніння аеродинамічних поверхонь і конструктивних елементів може негативно впливати на безпеку польоту, функціонування систем та ефективність виконання завдань.

Обледеніння літальних апаратів – складний процес, що виникає внаслідок утворення льоду на їхніх аеродинамічних поверхнях. Для великих літаків ця проблема частково вирішується шляхом використання потужних систем термозахисту та технологій проти обледеніння. Однак для малих БПЛА такі системи часто недоступні через обмежені енергетичні ресурси та конструктивні особливості. Це робить аналіз



умов обледеніння та розробку ефективних методів їхньої мінімізації особливо актуальними.

Матеріал і результати досліджень. Утворення льоду на аеродинамічних поверхнях знижує підйомну силу, збільшує опір і викликає вібрації – виникає необхідність у збільшенні кута атаки, що призводить до втрати швидкості, висоти та переводу БПЛА в неоптимальний режим. Обледеніння керуючих поверхонь може повністю позбавити апарат керованості, тоді як лід на гвинтах знижує тягу, а на сенсорах — точність навігації. Додаткова маса льоду та підвищене енергоспоживання критично впливають на малі БПЛА з обмеженими ресурсами.

Варто зазначити, що за однакових метеорологічних умов обледеніння має більш серйозний вплив на малі БПЛА, ніж на великі повітряні судна. Невеликий запас підйомної сили призводить до того, що навіть незначні зміни форми профілю крила через льодові нарости можуть суттєво погіршити аеродинамічні характеристики та керованість. Крім того, на менших за розміром профілях льодові утворення, за однакових умов, мають відносно більші розміри та значніше змінюють їхню форму, що ще більше впливає на аеродинаміку. Обмежені енергетичні ресурси малих БПЛА не дозволяють використовувати потужні системи термозахисту, а збільшення маси через утворення льоду може критично вплинути на балансування апарата та призвести до втрати керованості.

У цьому дослідженні основна увага зосереджена на малих БПЛА масою від 15 до 150 кг, які поєднують компактність і мобільність із достатньою вантажопідйомністю. Це робить їх оптимальними для виконання широкого спектра завдань, зокрема моніторингу, розвідки, картографування, пошуково-рятувальних операцій.

Залежно від конкретної місії та типу БПЛА, маршрут і умови польоту можуть змінюватися, однак у більшості випадків малі БПЛА працюють на висотах до 1000 м, де ризик обледеніння є найвищим за мінусових або близьких до нуля температур і високої вологості.

Обледеніння літальних апаратів і їхніх елементів найчастіше відбувається в температурному діапазоні від 0°C до -20°C. За вищих температур лід, як правило, не утворюється, а за нижчих переохолоджені краплі вже перебувають у кристалізованому стані. Згідно з International Cloud Atlas [0] виокремлюють три основні типи хмар: низькі, середні та високі. У контексті розглянутих місій БПЛА найбільшу небезпеку становлять низькі хмари, розташовані на висотах до 2000 м. Особливу увагу слід приділити шаруватим і купчастим хмарам, оскільки ймовірність утворення льоду в них найвища.



Дані про характеристики обледеніння містяться в Кодексі федеральних правил (CFR), розділ 14, частина 25, додатки С і О, а також у частині 29, додаток С [6].

Додаток С надає можливість аналізувати параметри рідкого водного вмісту (LWC), середнього ефективного діаметру крапель (MED), температури та протяжності зон обмерзання, характерних для шаруватих і купчастих хмар. Такий комплексний підхід дає змогу об'єктивно оцінювати ризики виникнення обмерзання БПЛА залежно від специфіки їхньої експлуатації.

LWC у шаруватих хмарах нижчий порівняно з купчастими, особливо за великих значень MED. У купчастих же хмарах LWC вищий, а його залежність від температури виражена більш яскраво, що вказує на складну структуру і динаміку цих хмар. За нижчих температур спостерігається зниження LWC для обох типів хмар, що пов'язано або з процесами замерзання крапель, або зі зменшенням LWC за нижчих температур.

Імовірність того, що LWC досягне максимального значення, встановленого для даної температури і еталонної протяжності хмарності, становить 99%. При цьому еталонна протяжність шаруватих хмар становить 32,2 км, а купчастих – 4,8 км. У реальних умовах ці значення можуть відрізнятися, тому для уточнення параметра LWC застосовують коригувальні коефіцієнти. Коригувальний коефіцієнт враховує протяжність зони короткочасного обмерзання. Для обох типів хмар збільшення відстані, на якій проводиться усереднення, призводить до зниження максимально можливого значення LWC, і навпаки, зменшення протяжності зони обмерзання підвищує його значення.

Додаток О враховує великі переохолоджені краплі, характерні для замерзаючої мряки і замерзаючого дощу. Ці умови становлять серйозну загрозу для малих БПЛА, оскільки можуть спричинити інтенсивне обмерзання, що призводить до значних змін аеродинамічних характеристик, відмов систем керування і зниження стійкості апарата в польоті.

Висновок. Малі БПЛА більш схильні до обмерзання порівняно з великими літальними апаратами. Обмежені енергоресурси, мала вантажопідйомність і специфічні умови експлуатації роблять їх особливо вразливими. Висока вологість і низькі температури на малих висотах сприяють швидкому утворенню криги, водночас традиційні антикригові системи часто не можуть бути застосовані через обмеження за вагою та енергоспоживанням.

Наявні метеорологічні дослідження і стандарти дають змогу прогнозувати ймовірність обмерзання малих БПЛА. Однак подальші дослідження в цій галузі



необхідні для створення спеціалізованих технологій захисту, які підвищують надійність і безпеку безпілотних систем у складних погодних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

5. Home International Cloud Atlas. International Cloud Atlas. <https://cloudatlas.wmo.int>
6. Aircraft ice protection. Advisory Circular of Federal Aviation Administration 20-73A (2006).
7. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS-25, Amendment 17. European Aviation Safety Agency (2015).
8. Richard K. (2002) Jeck Icing Design Envelopes (14 CFR Parts 25 and 29, Appendix C). Converted to a Distance-Based Format.



Каіров Олексій¹, Каіров Володимир²

¹професор, докт. техн. наук, професор, Національний університет
кораблебудування, Миколаїв, Україна, e-mail: alexkairov2@gmail.com

²доцент, канд. техн. наук, доцент, Національний університет
кораблебудування, Миколаїв, Україна, e-mail: vladimir.kairov@gmail.com

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКТИВНО НЕОДНОРІДНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Розглянуто вимушені коливання підкріплених ребрами циліндричних оболонок з отворами та приєднаними твердими тілами. Розроблена уточнена математична модель напружено-деформованого стану оболонкової системи, що враховує конструктивну неоднорідність оболонкової системи. Задача розв'язується в лінійній постановці методом скінчених елементів з урахуванням дискретного розміщення ребер. Наведено результати чисельного дослідження впливу нормальної рівномірно розподіленої збуджуючої сили, що змінюється за гармонійним законом, отворів, приєднаних твердих тіл та інших конструктивних особливостей на амплітуди вимушених коливань, деформації і напруження оболонки.

Ключові слова: неоднорідна циліндрична оболонка, напружено-деформований стан, вимушені гармонічні коливання, отвори, підкріплюючі ребра, приєднані тверді тіла, метод скінчених елементів.

Вступ. Особливе місце в розрахунковій практиці інженерних конструкцій займають завдання розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) тонких пружних конструктивно неоднорідних оболонок з дискретно приєднаними твердими тілами. Підвищення їх віброміцності та несучої здатності при динамічному навантаженні має важливе практичне значення. Отвори, приєднані тіла і підкріплюючі ребра створюють конструктивну неоднорідність оболонкових конструкцій і роблять істотний вплив на їх амплітудно-частотні характеристики та напружений стан. Огляд досліджень, присвячених даній проблемі, наведено в роботах [1, 2, 5].

Метою даної роботи є дослідження впливу отворів, підкріплюючих ребер, приєднаних твердих тіл та їх дискретного розміщення на напружено-деформований стан оболонкової системи.



Матеріал і результати досліджень. Розглядається тонка пружна оребрена оболонка обертання з регулярним підкріпленням стрингерами і шпангоутами, що має вирізи і несе приєднані тверді тіла, дискретно розподілені на зовнішній поверхні (рис. 1). На оболонку діє нормально рівномірно розподілене навантаження, що змінюється в часі по гармонійному закону. Деформований стан оболонкової системи розглядається в лінійній постановці на основі теорії тонких пружних оболонок з використанням гіпотез Кірхгофа-Лява.

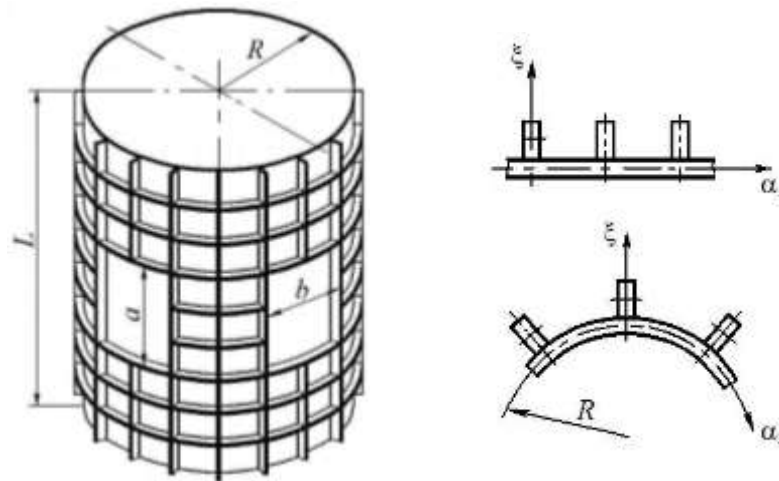


Рисунок 1 – Модель оболонкової структури

Задача вирішується методом скінченних елементів (МСЕ) [4, 6]. Опис динамічної поведінки оболонки виконується шляхом її дискретизації ізопараметричними скінченними елементами. Використовуючи варіаційний принцип Лагранжа, отримаємо рівняння гармонійних коливань оболонкової системи:

$$[M] \left\{ \frac{d^2 q}{dt^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{dq}{dt} \right\} + [K] \{q\} = \{F\}, \quad (1)$$

де $\{q\}$ – вектор узагальнених переміщень вузлів скінченно-елементної оболонкової моделі; $[K], [M]$ – матриці жорсткості та мас; $[C] = 2\xi[M]$ – матриця демпфування; ξ – коефіцієнт демпфування; $\{F\}$ – вектор обурюючих зовнішніх сил.

Обчислення амплітуд вібропереміщень виконується методом розкладання переміщень за власними формами коливань [4]. В задачах гармонічного аналізу використовуються ті ж самі матриці жорсткості $[K]$ та мас $[M]$, що і в модальному аналізі. Матриця демпфування $[C]$ враховує дисипацію енергії, що пов'язана з внутрішнім тертям матеріалу, характером з'єднань елементів конструкції між собою та



амплітудно-частотними характеристиками [4]. Коефіцієнти демпфування визначаються для всієї оболонкової системи виходячи з її дисипативних властивостей і демпфуючої здатності [3].

Рішення системи (1) для малих коливань шукаємо в наступному вигляді:

$$\{q\} = \{q_0 (\cos \varphi + i \sin \varphi)\} e^{i\Omega t}, \quad (2)$$

де q_0 – вектор амплітуд переміщень вузлів моделі; $\{q_1\} = \{q_0 \cos \varphi\}$, $\{q_2\} = \{q_0 \sin \varphi\}$ – дійсна і уявна частина вектора переміщень; Ω – кругова частота збуджуючих зовнішніх сил; i – уявна одиниця; φ – зсув фаз для переміщень; t – координата часу.

Оскільки зовнішнє навантаження, що збурює коливання, періодичне, вектор динамічних сил може бути представлений у вигляді суми термінів тригонометричного ряду Фур'є аналогічно вектору переміщень:

$$\{F\} = \{F_0 (\cos \psi + i \sin \psi)\} e^{i\Omega t} = (\{F_1\} + i \cdot \{F_2\}) e^{i\Omega t}, \quad (3)$$

де F_0 – амплітуда сил; $\{F_1\} = \{F_0 \cos \psi\}$, $\{F_2\} = \{F_0 \sin \psi\}$ – дійсна і уявна частина вектора сил; ψ – зсув фаз для сил.

Після підстановки (2) і (3) в рівняння (1) та деяких перетворень, отримаємо рівняння для визначення амплітуд коливань. Задача щодо визначення амплітуд і силових характеристик гармонійних коливань оболонкової конструкції вирішується методом суперпозиції мод [4]. З використанням отриманих значень амплітуд вимушених коливань у вузлах елемента, з використанням співвідношень Коші і закону Гука визначаються їх деформації і напруги.

Досліджено вплив різних граничних умов, рівномірно розподілених ребер, отворів та маси приєднаного тіла на амплітудні характеристики та НДС сталевій оболонки. Виконано зіставлення отриманих чисельних результатів з рішеннями, отриманими з використанням пакету прикладних програм ANSYS і експериментальними даними.

Висновки. Отримані на основі розробленої уточненої математичної моделі чисельні результати показують, що приєднане тверде тіло і отвори роблять істотний вплив на напружено-деформований стан і амплітудно-частотні характеристики тонкостінних оболонок. Виявлено нові залежності, закономірності і механічні ефекти, обумовлені конструктивними неоднорідностями оболонкової системи, що мають важливе наукове і практичне значення і дозволяють розробити заходи щодо поліпшення її вібродинамічних характеристик. Методика розрахунку на основі МСЕ може бути



використана при проектуванні конструктивно неоднорідних оболонкових конструкцій при розрахунках на динамічне навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Каіров, В.О., & Шевченко, В.П. (2015). Напружено-деформований стан підкріплених оболонок з приєднаними твердими тілами при вимушених коливаннях. *Вісник Дніпропетровського університету: Науковий журнал. Серія: Механіка.* (19), 56-64.
2. Селиванов, Ю.М., & Ключник, Д.В. (2007). Голографічний і скінченно-елементний аналіз власних коливань циліндричної оболонки, ослабленої круговим отвором. *Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла,* (8), 140-149.
3. Трощенко, В.Т., & Курият, Р.І., & Лебедев, А.А. (2005) *Міцність матеріалів і конструкцій.* К.: Академперіодика.
4. Bathe, K.J. (2006). *Numerical methods in finite element analysis.* Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
5. Kairov A.S. Effect of holes of the eigenmodes of reinforced shells of rotations. (2001). *Journal of Mathematical Sciences.* (3), 393-397.
6. Zienkiewicz, O.C., & Teylor, R.L. (2000). *The finite element method.* Oxford: Jordan Hill.



Безверхий Дмитро¹, Данішевський Владислав²

¹аспірант, УДУНТ ННІ ПДАБА, Дніпро, Україна, e-mail: bezup.inc@gmail.com

²директор ННІ ПДАБА, доктор технічних наук, професор, УДУНТ ННІ ПДАБА, Дніпро, Україна, e-mail: vladyslav.danishevskyy@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ НЕОДНОРІДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ СЕЙСМІЧНОГО ТА ВІБРОЦІЙНОГО ЗАХИСТУ

Анотація. У статті розглядаються шаруваті конструкції для вібро- та сейсмоізоляції, аналізуються їх динамічні властивості. Наведено характеристики моделей із бетону та гуми, досліджено згасання енергії пружних хвиль. Результати дозволяють розробляти неоднорідні матеріали для захисту будівель від сейсмічних впливів, вібрацій та забезпечення акустичної ізоляції.

Ключові слова: Шаруваті конструкції, віброізоляція, сейсмоізоляція, пружні хвилі, згасання енергії, неоднорідні матеріали, динамічні властивості.

Вступ. Сучасні виклики, пов'язані з сейсмічною активністю та вібраційними навантаженнями, вимагають розробки інноваційних матеріалів і конструкцій для захисту будівель та інфраструктури. Шаруваті неоднорідні структури, що поєднують різні матеріали, такі як бетон і гума, є перспективним рішенням для вібро- та сейсмоізоляції. У роботі аналізуються їх динамічні властивості, зокрема згасання пружних хвиль, та розглядаються можливості застосування для створення ефективних захисних систем..

Матеріал і результати досліджень. Ця робота зосереджена на створенні шаруватих систем для захисту споруд від сейсмічних впливів та вібрацій. Розмір діапазонів частот, де блокується проходження хвиль, зростає зі збільшенням різниці в механічних властивостях між складовими матеріалами. Одним із ефективних підходів є застосування комбінації шарів із бетону та гуми [1; 2]. Щільність бетону і твердої гуми відрізняється приблизно вдвічі, тоді як їхні модулі пружності можуть різнитися до 10^5 разів.

За заданих характеристик матеріалів частоти зон блокування можна регулювати, змінюючи розмір l періодичної комірки конструкції. Перша зона блокування виникає, коли $l=L/2$, де L – довжина хвилі [4]. Отже, для гасіння хвиль із нижчими частотами необхідно збільшувати розмір комірки періодичності, а разом із ним і товщину шарів.

У дослідженні аналітичні рішення для дисперсійних характеристик шаруватих систем отримано за допомогою методу Флоке-Блоха [4]. Чисельне моделювання



процесів поширення пружних хвиль проведено в програмному комплексі Ansys, причому аналітичні та чисельні результати демонструють високу відповідність один одному.

Розглянуто дві моделі конструкцій із бетону та гуми, параметри яких подано в таблиці. Модель 1 призначена для захисту від вібрацій і забезпечує максимальне загасання пружних хвиль на частоті 50 Гц. Модель 2 розроблена для протидії сейсмічним навантаженням на основі даних сейсмограми землетрусу в Оровіллі (Каліфорнія) 1975 року, де пік руйнівних частот припав на 18 Гц [5].

Таблиця 1 – Характеристики шаруватих конструкцій

Параметр	Модель 1	Модель 2
Густина бетону, кг/м ³	2300	2300
Модуль Юнга бетону, Па	$3,14 \cdot 10^{10}$	$3,14 \cdot 10^{10}$
Об'ємна частка бетону	0.5	0.5
Густина гуми, кг/м ³	1300	1300
Модуль Юнга гуми, Па	$5,8 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$
Об'ємна частка гуми	0,5	0,5
Ширина комірки періодичності, м	0,3	0,4

На рисунках 1 і 2 показано, як змінюється рівень затухання енергії сигналу залежно від частоти для моделей 1 та 2 відповідно. Поряд з кожною кривою вказано число комірок періодичності. З аналізу даних випливає, що шарувата конструкція, що складається всього з п'яти комірок, ефективно захищає від динамічних впливів, знижуючи енергію хвилі на заданій частоті до рівня 60 дБ (у 10^6 разів).

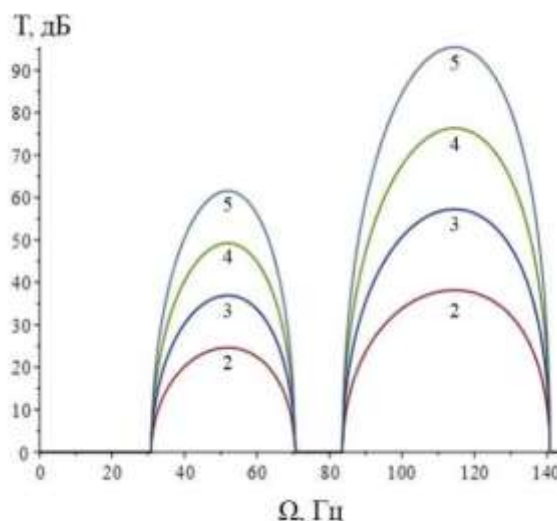


Рисунок 1 – Згасання енергії пружних хвиль (модель 1)



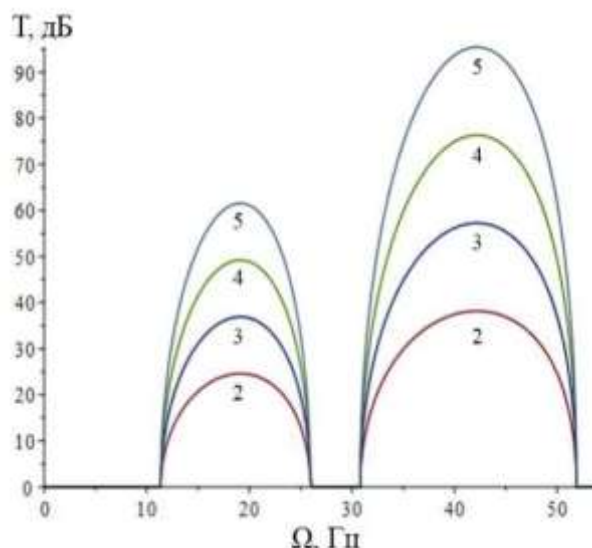


Рисунок 2 – Згасання енергії пружних хвиль (модель 2)

Висновки. Дослідження шаруватих конструкцій із бетону та гуми підтвердило їх високу ефективність для вібро- та сейсмоізоляції, забезпечуючи згасання енергії пружних хвиль до 60 дБ (у 10^6 разів) на розрахункових частотах. Отримані результати мають важливе значення для науки та практики, зокрема для розробки інноваційних матеріалів для захисту будівель від динамічних впливів і створення акустичної ізоляції. Перспективи подальших досліджень включають аналіз складніших неоднорідних структур та їх адаптацію до різних сейсмічних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Xiang, H. J., Shi, Z. F., Wang, S. J., & Mo, Y. L. (2012). Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: experimental validation. *Smart Materials and Structures*, 21, 112003-1–112003-10.
2. Shi, Z., Cheng, Z., & Xiang, H. (2014). Seismic isolation foundations with effective attenuation zones. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 57, 143–151.
- 3 Aravantinos-Zafiris, N., & Sigalas, M. M. (2015). Large scale phononic metamaterials for seismic isolation. *Journal of Applied Physics*, 118, 064901-1–064901-6.
4. Andrianov, I. V., Awrejcewicz, J., & Danishevskyy, V. V. (2021). *Linear and Nonlinear Waves in Microstructured Solids: Homogenization and Asymptotic Approaches*. Boca Raton: CRC Press.
5. PEER Ground Motion Database. URL: <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-groundmotion-databases>.



Кучин Ілля¹, Данішевський Владислав²

¹аспірант, УДУНТ ННІ ПДАБА, Дніпро, Україна, e-mail: illiakuchyn@gmail.com

²директор ННІ ПДАБА, доктор технічних наук, професор, УДУНТ ННІ ПДАБА,
Дніпро, Україна, e-mail: vladyslav.danishevskyy@gmail.com

ВПЛИВ КОНФІГУРАЦІЇ КРУГЛИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА ЗАТУХАННЯ ХВИЛЬ У КОМПОЗИТНІЙ БАЛЦІ

Анотація. У роботі досліджено вплив геометричної конфігурації круглих включень на загасання хвиль у композитній балці. Порівняно ефективність гумових включень та порожніх просторів у бетонній балці за допомогою чисельного моделювання. Результати показали, що гумові включення забезпечують краще розсіювання енергії та зменшення амплітуди переміщень.

Ключові слова: композитна балка, загасання хвиль, геометрична конфігурація, гумові включення, чисельне моделювання.

Вступ. Композитні балки з круглими включеннями є перспективним рішенням для контролю поширення хвиль у таких сферах, як сейсмічний захист та віброізоляція, що підтверджується дослідженнями у галузі фононних матеріалів і структур [1]. Геометричні характеристики включень, зокрема їх розмір, розташування та відстань між ними, суттєво впливають на розсіювання енергії та загасання хвиль. Незважаючи на значний потенціал таких конструкцій, комбінований вплив геометрії включень та контрасту матеріалів залишається недостатньо дослідженим. Метою цього дослідження є оцінка того, як геометричні конфігурації круглих включень впливають на загасання хвиль у композитних балках, а також пошук шляхів оптимізації конструкцій для покращення віброізоляції та розсіювання енергії за допомогою чисельного моделювання.

Матеріал і результати досліджень.

Для дослідження використано композитну балку з бетону та гуми, що дозволяє моделювати періодично гетерогенні середовища, як описано в [2]. Бетон забезпечує міцність і жорсткість, тоді як гума сприяє поглинанню енергії та демпфуванню вібрацій, що робить цю комбінацію ідеальною для сейсмічного захисту. Розглянуто два варіанти конфігурації: балка з гумовими включеннями та балка з порожніми просторами замість



включень. Геометрія балки становить 0,4 м у висоту та 4 м у довжину, з комітками розміром 0,4 м $\times$ 0,4 м, де включення займають 50% площі комітки (радіус $\approx 0,1596$ м).

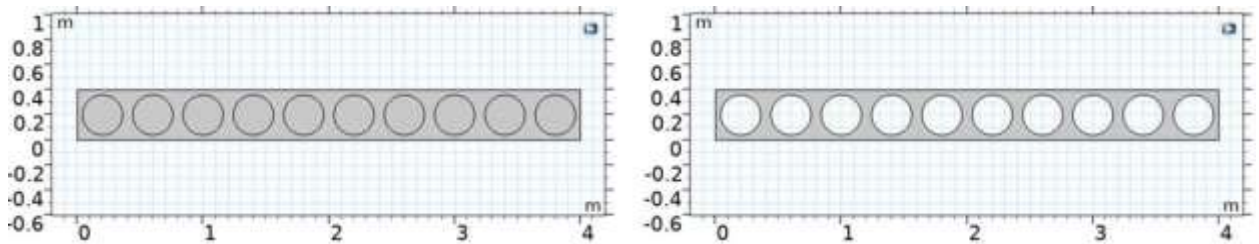


Рисунок 1 – Геометрична конфігурація композитної балки з круглими включеннями (ліворуч: з гумовими включеннями, праворуч: з порожніми просторами)

Характеристики матеріалів наведено в таблиці 1:

Таблиця 1 – Характеристики матеріалів

Матеріал	Щільність (кг/м ³)	Модуль Юнга (Па)	Коефіцієнт Пуассона
Бетон	2300	3.14×10^{10}	0.2
Гума	1300	1.4×10^5	0.48

До лівого кінця балки прикладено хвильове навантаження з частотою 50 Гц та амплітудою 1000 кН/м², а правий кінець був закріплений. Чисельне моделювання проводилося методом скінченних елементів із використанням відповідних сіток для обох конфігурацій.

Результати моделювання показали, що гумові включення значно ефективніше зменшують амплітуду хвиль порівняно з порожніми просторами. Аналіз поля переміщень у напрямку X продемонстрував відмінності у поширенні хвиль для обох конфігурацій.

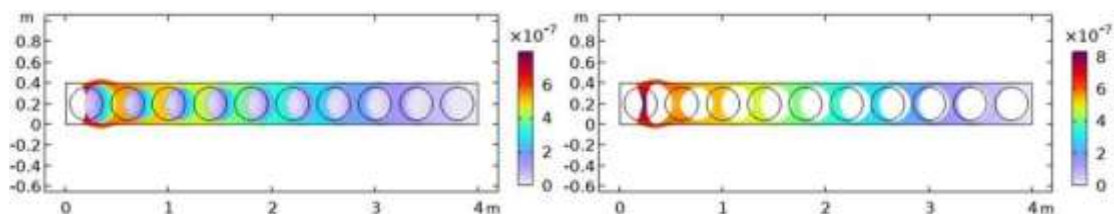


Рисунок 2 – Поле переміщень у напрямку X для обох конфігурацій: бетон з гумовими включеннями (ліворуч) та бетон з порожніми просторами (праворуч) при $t = 0,00454$ с

Лінійні графіки переміщень уздовж балки підтвердили, що в конфігурації з гумовими включеннями амплітуда хвилі зменшується швидше з відстанню від джерела навантаження, ніж у випадку з порожнинами.



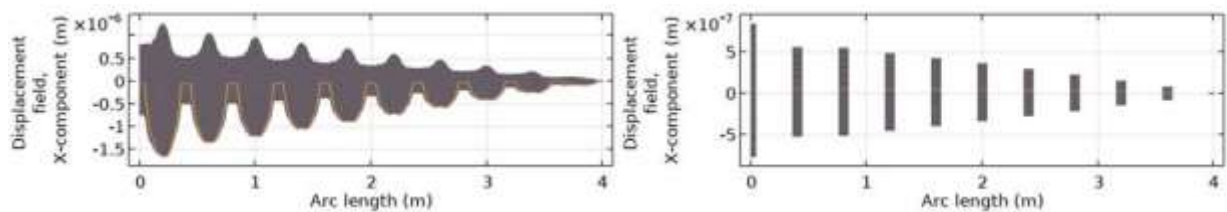


Рисунок 3 – Лінійні графіки переміщень уздовж балки для обох конфігурацій: бетон з гумовими включеннями (ліворуч) та бетон з порожніми просторами (праворуч)

Порівняння переміщень у точках на відстанях 0,0 м, 0,8 м, 1,6 м, 2,4 м і 3,2 м від джерела навантаження показало, що гумові включення забезпечують більш ефективне загасання хвиль, особливо на більших відстанях.

Висновки. Дослідження показало, що гумові включення суттєво підвищують ефективність загасання хвиль у композитних балках порівняно з порожніми просторами, демонструючи кращі показники розсіювання енергії та зменшення амплітуди переміщень. У майбутньому планується дослідити вплив включень інших форм та комбінацій матеріалів, а також провести експериментальну валідацію результатів моделювання, подібно до досліджень [3, 4], для подальшого вдосконалення конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hussein, M. I., Leamy, M. J., & Ruzzene, M. (2014). Dynamics of phononic materials and structures: historical origins, recent progress, and future outlook. *Applied Mechanics Reviews*, 66, 040802.
2. Colquitt, D. J., Danishevskyy, V. V., & Kaplunov, J. D. (2019). Composite dynamic models for periodically heterogeneous media. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 24, 2663–2693.
3. Xiang, H. J., Shi, Z. F., Wang, S. J., & Mo, Y. L. (2012). Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: experimental validation. *Smart Materials and Structures*, 21, 112003.
4. Yan, Y., Mo, Y. L., Menq, F-Y., Stokoe, K. H., Perkins, J., & Tang, Y. (2014). Development of seismic isolation systems using periodic materials. Technical Report Project no. 113219: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.



Купнєвич Леонід¹, Ковтун-Горбачова Тетяна²

¹інженер НДЧ каф. ОПЦтаТБ ННІ ПДАБА, м. Дніпро, leonbuilding@meta.ua

²к.т.н, доц. каф. МДіПК ННІ ПДАБА, м. Дніпро

ПЕРСПЕКТИВНІ КОНСТРУКЦІЇ БАШТОВИХ СПОРУД ДЛЯ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ

Анотація. Висвітлено потребу у національній системі маловисотної радіолокації та роль у ній баштових споруд. Показані переваги різноманітних перспективних конструкцій баштових споруд.

Ключові слова: перспективні конструкції баштових споруд, маловисотна радіолокація.

Вступ. Розвиток радіолокації під час Другої світової війни, змусив реактивну авіацію, що тільки-но зародилася, вже у 1950-ті роки, освоювати малі висоти – 300-500 м. Радіолокація відповіла розвитком апаратури та методик виявлення об'єктів у повітрі, на фоні потужного відбиття радіолокаційного випромінення від поверхні.

Виникнення маловисотної радіолокації змусило розробляти тактичні прийоми прольоту на гранично малих висотах, в декілька десятків метрів від поверхні, використовуючи рельєф та об'єкти на місцевості.

Так нищпорити можуть крилаті ракети, пілотовані та безпілотні безекіпажні літальні апарати, мала авіація. А при масових повітряних ударах, це доповнюється широким використанням активних і пасивних перешкод прикриття.

Безперервно функціонуюча низьковисотна радіолокація – актуальна задача не тільки для лінії фронту, а і для тилу. Як для військової протиповітряної оборони, так і для об'єктових протиповітряних підрозділів. Тобто, перекриття променями маловисотної радіолокації, потрібне взагалі для всієї території країни. Або потрібно створення суцільної лінії виявлення.

Матеріал і результати досліджень. Дієвий, і можна сказати, обов'язковий елемент якісної роботи апаратури системи маловисотної радіолокації – винесення фазового центру радіолокаційної антени на висоту декількох десятків метрів над поверхнею.

В той же час, підняття на подібну висоту вогневих засобів для знищення повітряних цілей, також дозволяє перекрити низьковисотні сліпі плями і використати вогневі можливості зброї по максимуму.



Така потреба великої кількості баштових споруд вимагає аналізу всіх численних можливих, а в перш чергу – перспективних конструкцій. Адже на перший план виходить не тільки, і не стільки, мінімум маси. А в першу чергу - збірність-розбірність, можливість спорудження у польових умовах, подальша можливість використання у цивільних цілях.

Перспективні баштові конструкції, що можуть задовільнити перелічені вище умови:

Суцільні вежі. Хоча вони, як правило, мають конструкцію неоптимальну, з точки зору НДС, існує технологія зварних спірально-витих оболонок, що розроблена спеціально для польового виробництва баштових споруд.

Однак, і при більш традиційному виробництві на заводах, є можливості оптимізації баштової конструкції, за рахунок різних варіантів з'єднань циліндричних частин ствола башти.

Башти-мачти. Спеціально розроблені для військової польової радіолокаційної та радіоапаратури. Поєднують переваги двох видів конструкцій.

Решітчасті вежі. Найбільш поширений варіант баштових споруд різного призначення. Тому і найбільш оптимізований під НДС.

Однак, і в решітчастих конструкціях є багато можливостей поліпшення. Наприклад, використання трубчатого профілю, замість кутиків.

Сітчасті конструкції. Найскладніші баштові конструкції для проектування. Однак, витрачений час того коштує – у порівнянні з іншими конструкціями мають найменшу матеріалоемність.

До того ж, сітчасті конструкції прості у спорудженні у польових умовах.

Комбіновані конструкції. Однією з головних розрахункових задач баштових споруд є визначення висоти, в якій можна зробити перехід від суцільного перерізу опори на решітчастий. Поєднання цих двох видів конструкцій дозволяє, в кожному конкретному випадку, одночасно використати переваги обох, нівелюючи їх недоліки.

Інші матеріали. Замість металу, можна використовувати дерево чи композити, задіюючи їх сильні якості.

Дерево – відносно доступний матеріал для спорудження баштових споруд у польових умовах. Мати на увазі такі варіанти важливо, оскільки військовим не завжди доступні промислові будівельні конструкційні матеріали та вироби.

Можлива і комбінація двох або більшої кількості конструкційних матеріалів, щоб максимально використати їх переваги і нівелювати недоліки.



Висновки. Потреба забезпечити нівелювання радіотіней для низьковисотної радіолокації по дуже великих лінії фронту та загалом території країни потребує:

- дослідження перспективних конструкцій баштових споруд;
- розробки засад національної програми військово-цивільного співробітництва для масового створення баштових споруд.



Володимир Кравець¹, Наталія Івантишин², Максим Філіпов³

¹ старший науковий співробітник, к.ф.-м.н., e-mail: volodym1960@gmail.com

² науковий співробітник, к.т.н., e-mail: n.ivantyshyn@gmail.com

³ молодший науковий співробітник, e-mail: maksym.filipov@gmail.com

¹⁻³ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

ВПЛИВ ЗАЛІКОВУВАННЯ ТРІЩИНИ В АНІЗОТРОПНІЙ ПЛАСТИНІ НА КОЕФІЦІЄНТИ ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ

Анотація. Розв'язано задачу математичної теорії тріщин для анізотропного тіла з частково заповненим дефектом. Використовуючи модель вінклерівської основи задачу зведено до розв'язування сингулярного інтегро-диференціального рівняння відносно функції переміщень точок берегів тріщини. Числовий розв'язок рівняння отримано методом квадратур. Визначено вплив рівня заповнення тріщини на зміну коефіцієнтів інтенсивності напружень у її вершинах.

Ключові слова: заліковування тріщини, анізотропне тіло, включення, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Вступ. Для відновлення несучої здатності пошкоджених різного роду елементів конструкцій тривалої експлуатації в інженерній практиці застосовують технологію ін'єкційного зміцнення дефектних зон [1], яка полягає у введенні в пошкоджені місця (тріщини, відшарування, порожнини) під тиском рідинних матеріалів, які після кристалізації чи полімеризації формують міцні адгезійні зв'язки з основним матеріалом. В результаті відповідний елемент конструкції зміцнюється і стає здатним витримувати задані експлуатаційні навантаження. Щоб оцінити міцність та залишковий ресурс відновлених таким чином елементів конструкцій необхідно мати розв'язки задач теорії пружності та механіки руйнування для тіл із заповненими тріщинами. Для ізотропних тіл такі задачі розглянуто раніше [1].

Інтегральне рівняння задачі. Розглянемо в декартовій системі координат xOy нескінченну анізотропну пластину з прямолінійною тріщиною довжини $2l$ на осі Ox (узагальнений плоский напружений стан). Пластина на нескінченності розтягується напруженням p уздовж осі Oy . Зауважимо, що за умов плоскої деформації анізотропного тіла співвідношення між компонентами тензорів деформацій і напружень мають такий же вигляд, тільки з дещо іншими пружними сталими [2]. Вважаємо, що ін'єкційний матеріал заповнює лише центральну частину тріщини на відріжку $[-a, a]$ і після його



тверднення на поверхні поділу матеріалів отримуємо ідеальний механічний контакт. Уявно видаляємо ін'єкційний матеріал із тріщини, замінюючи його дію напруженнями згідно з моделлю вінклерівської основи: $\sigma_{yy}(x) = E[u_y^*(x)]/2h(x)$, $\tau_{xy}(x) = 0$, $-a < x < a$, де E - модуль пружності за розтягу матеріалу ізотропного заповнювача тріщини після тверднення; $2h(x)$ - товщина включення, що виникло внаслідок заповнення; $[u_y^*(x)]$ - стрибок переміщень точок поверхонь включення: $u_y^* = u_y^0 + u_y$, $u_y^0 = a_{22}py$ - однорідна складова у-компоненти переміщень в анізотропній пластині, a_{22} - одна з пружних сталих анізотропного матеріалу пластини [2].

Методом суперпозиції сформульовану задачу зводимо до визначення збуреного напруженого стану пластини з розрізом довжиною $2l$, на поверхнях якого задані зусилля

$$\sigma_{yy}(x) = \begin{cases} -p + E[u_y^*(x)]/2h(x), & \tau_{xy}(x) = 0, & x \in [-a; a], \\ -p, & \tau_{xy}(x) = 0, & x \in [-l; -a] \cup [a; +l]. \end{cases} \quad (1)$$

За рахунок Ox , Oy -симетрій задачі на осі Ox поза відрізком $[-l, l]$ маємо нульові значення компонент дотичних напружень та вертикальних переміщень.

Комплексні потенціали напружень шукатимемо у вигляді [3]

$$\Phi_1(z_1) = \frac{\mu_2}{q_1\mu_2 - q_2\mu_1} \frac{1}{2\pi i} \int_{-l}^l \frac{g'(x)dx}{x - z_1}, \quad \Phi_2(z_2) = -\mu_1\Phi_1(z_1)/\mu_2, \quad (2)$$

де $g'(x) = dg(x)/dx$, $x \in [-l; +l]$, $g(x)$ - невідомі вертикальні переміщення точок верхнього берега тріщини, $q_k = a_{12}\mu_k + a_{22}/\mu_k - a_{26}$, $z_k = x + \mu_k y$ ($k = 1; 2$), μ_k - комплексні корені алгебраїчного характеристичного рівняння для анізотропної пластини, a_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$) - пружні сталі матеріалу пластини [2].

З крайової умови (1) та співвідношень (2) отримано сингулярне інтегро-диференціальне рівняння відносно невідомої функції переміщень $g(x)$ [3]:

$$\operatorname{Re} \left(\frac{1}{\pi i} \frac{\mu_1 - \mu_2}{q_1\mu_2 - q_2\mu_1} \right) \int_{-l}^l \frac{g'(x)dx}{x - t} = \begin{cases} Eg(t)/h(t) - p(1 - a_{22}E), & t \in [-a; a], \\ -p, & t \in [-l; -a] \cup [a; +l]. \end{cases} \quad (3)$$

Числові результати. Числовий розв'язок інтегрального рівняння (3) отримано методом квадратур [4]. Використавши залежності $g(t) = \int_{-l}^t g'(x)dx$, $g(\pm l) = 0$ і враховуючи кореневу особливість підінтегральної функції на кінцях проміжку інтегрування, перейдемо до визначення безрозмірної функції $w(\xi) = g'(x)\sqrt{1 - \xi^2}$, $x = l\xi$, $\xi \in [-1; 1]$. Рівняння (3), записане у безрозмірному вигляді,



зведено до розв'язування системи N_v лінійних алгебричних рівнянь відносно невідомих значень функції $w(\xi)$ у чебишовських вузлах $\xi_k = \cos\{\pi(2k-1)/(2N_v)\}$, $k = \overline{1, N_v}$. Для ортотропних матеріалів пластини ($\mu_1 = i\gamma_1$, $\mu_2 = i\gamma_2$) відносні коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) обчислювали за виразами

$$F_1^\pm = K_1^\pm / p\sqrt{\pi l} = \mp \frac{E_y \gamma_1 \gamma_2}{p(\gamma_1 + \gamma_2)} w(\pm 1) \quad (4)$$

у правій (верхній знак) та лівій (нижній) вершинах тріщини. Для розрахунків брали тріщини у формі сплющеного еліпса з півсями l , c ($c/l=0.1$), для якого $h(x) = c\sqrt{1-x^2}/l^2$. Зниження відносних КІН $F_1 = F_1^+ = F_1^-$ (4) суттєво залежить від рівня заповнення тріщини (параметра a/l) а також від пружних характеристик ортотропного матеріалу пластини (рис. 1а) та модуля Юнга ізотропного матеріалу заповнювача (рис. 1б).

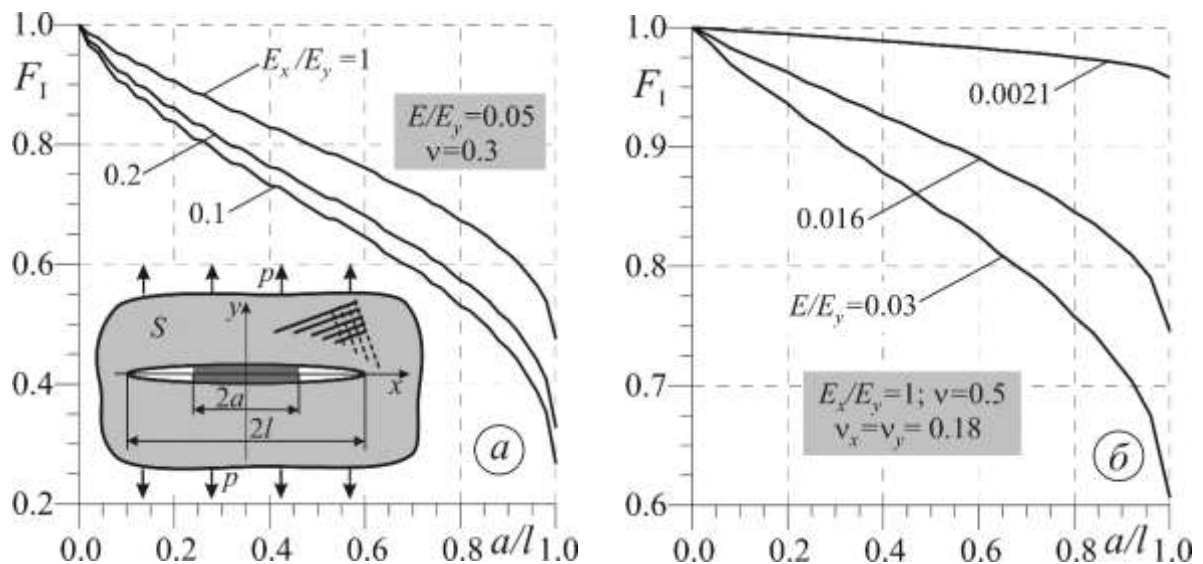


Рисунок 1 – Вплив рівня заповнення тріщини a/l на відносні КІН в ортотропній (а) та ізотропній (б) пластинах для різних ін'єкційних матеріалів.

Для повністю заповненої тріщини у формі сплющеного еліпса отримані значення для функції переміщень $g(x)$ співпадають з відомим аналітичним розв'язком [3].

Висновки. Плоску задачу теорії пружності для анізотропної пластини із частково заповненою тріщиною зведено до розв'язування сингулярного інтегродиференціального рівняння відносно функції переміщень точок поверхні тріщини. На основі числового розв'язку рівняння, отриманого методом квадратур, розраховано КІН у вершинах частково заповненої тріщини у формі сплющеного еліпса. Досліджено вплив часткового заповнення тріщини ін'єкційними матеріалами різних жорсткостей, рівня



ортотропії матеріалу пластини на зниження КІН (зміцнення пластини). Отримані результати можуть бути використані для подання рекомендацій щодо максимального зміцнення різного роду несучих елементів конструкцій з дефектами типу тріщин через вибір матеріалів як для основного тіла, так і для заповнювача дефектів.

Дослідження проведені в рамках виконання гранту Національного фонду досліджень України № 2023.04/0132.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Panasyuk, V. V., Marukha, V. I., and Sylovanyuk, V. P. (2014). *Injection Technologies for the Repair of Damaged Concrete Structures*, Springer, Berlin.
2. Lekhnitskii, S. G. (1968) *Anisotropic Plates*, Gordon & Breach, New York.
3. Sylovanyuk, V.P., Ivantyshyn, N.A. (2020) Healing of Cracks in Anisotropic Bodies. *Materials Science*, (55), 804–811.
4. Kravets' V. S. (2016). Stress-strain state of a half plane with internal subsurface cracks. *Materials Science*, (51), 793-803.



Федоряченко С.О., Король В.М., Вишневецький В.В.

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»***АНАЛІЗ КРИХКОГО ТА ПЛАСТИЧНОГО РУЙНУВАННЯ ОБОЛОНОК ПРИ
ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОМУ МЕХАНІЧНОМУ ВПЛИВІ****INVESTIGATION OF DUCTILE AND BRITTLE SHELL FRAGMENTATION
WHILE HIGH-ENERGY MECHANICAL INFLUENCE**

Fedoriachenko S.O., Korol V.M., Vyshnevetsyi V.V.

Dnipro University of Technology

Анотація. У роботі представлено всебічний огляд моделювання циліндричних оболонок в із застосуванням методу скінчених елементів з акцентом на поведінці пластичного та крихкого руйнування під дією вибухового навантаження. Особлива увага приділяється високовуглецевим легованим сталям, які демонструють виражене фрагментування або квазикрихку поведінку та можуть утворювати менші, швидші фрагменти за певних умов. Обговорюються ключові чисельні підходи до моделювання фрагментації та розрахунку кінетичної енергії осколків, а також досліджуються відповідні конститутивні рівняння - зокрема, закон Джонсона-Кука із визначення пластичності при високих швидкостях деформації та параметри лінійної пружної механіки руйнування для фрагментативного типу руйнування. Наголошується на мікроструктурних факторах (розмір зерен, розподіл карбідів), які визначають руйнування та розподіл маси фрагментів.

Ключові слова: детонаційна хвиля, високоенергетичний вплив, пластичне руйнування, крихке руйнування.

Вступ. Вибухова фрагментація металевих оболонок є ключовим аспектом багатьох оборонних застосувань, від гранат до артилерійських снарядів. Циліндрична геометрія є поширеним конструктивним вибором, що забезпечує передбачуваний розподіл фрагментів при радіальному розширенні. Однак вибір матеріалу є вирішальним. Низьковуглецеві сталі зазвичай призводять до помірної фрагментації з масивнішими фрагментами (внаслідок пластичного руйнування), тоді як високовуглецеві сталі можуть демонструвати більш крихке руйнування і утворювати



численні дрібні фрагменти з потенційно вищою початковою швидкістю. Чисельне моделювання дозволяє детально відтворити розширення циліндричної оболонки під дією вибухового навантаження, враховуючи відносно великі пластичні деформації або крихкі тріщини при високих швидкостях деформації; термічне розм'якшення, утворення адіабатичних зсувних смуг або поширення крихких мікротріщин залежно від мікроструктури; а також швидкість осколків і розподіл маси фрагментів, які разом визначають ефективність ураження оболонки.

Експериментальні роботи підкреслюють, що високовуглецеві сталі можуть зазнавати крихкого руйнування під дією високоенергетичного навантаження, що призводить до утворення більш дрібних і численніших фрагментів. Мікроструктурний аналіз показує, що леговані карбіди та рафіновані зерна сприяють міжкристалітним або транскристалітним мікротріщинам, що суттєво змінює розподіл маси фрагментів і середній розмір фрагментів.

Для точного та візуально контрольованого розрахунку найбільш доцільним методом є чисельне моделювання. Типова циліндрична оболонка дискретизується з використанням тривимірних елементів (наприклад, тетраедричних або гексаедричних). Уточнення сітки виконується в зонах з високою швидкістю деформації або поблизу концентраторів напружень (можливих місць ініціації тріщин). У менш критичних областях можна використовувати грубіші сітки для зменшення обчислювальних витрат. Досягнення точного відтворення ударних хвиль і поширення тріщин вимагає врахування критеріїв ерозії елементів для пластичного або крихкого руйнування.

Постановка задачі. При малому кроці часу (Δt), обмеженому умовою Куранта-Фрідрікса-Леві:

$$\Delta t \leq \frac{l_{min}}{c_{wave}},$$

де l_{min} – найменший розмір елемента; c_{wave} – локальна швидкість поширення хвилі.

Існують два основні підходи для прикладення внутрішніх навантажень від вибухових речовин (ВР):

1. **Емпіричні криві ConWep**, які параметризуються масою заряду та геометрією, забезпечуючи існування функції тиску від часу.
2. **Методи сполученого Ейлер-Лагранжевого моделювання**, що дозволяє явно моделювати детонаційну хвилю та взаємодію рідини зі структурою.

Для циліндричних оболонок розв'язувач відстежує радіальне розширення до моменту руйнування, після чого можна визначити швидкості окремих фрагментів.



Пластичні сталі (наприклад, середньовуглецеві сталі з достатньою в'язкістю) добре моделюються за допомогою закону Джонсона–Кука.

$$\sigma(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p, T^*) = [A + B(\epsilon_p)^2][1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p)][1 - (T^*)^m]$$

де ϵ_p - пластична деформація, $\dot{\epsilon}_p$ - швидкість деформації, T^* - гомологічна температура, a, A, B, C, n, m - константи.

Ця модель враховує зміцнення при швидкісній деформації, термічне розм'якшення та значну пластичність перед в'язким руйнуванням або ерозією елементів. Високовуглецеві сталі можуть руйнуватися шляхом транскристалітного або міжкристалітного фрагментування з мінімальним пластичним плином. Модель, близька до пружно-пластичної, часто поєднується з критичним напруженням (σ_c) або критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень (K_{Ic}) для моделювання ерозії елементів.

Лінійно-пружна механіка руйнування може керувати розповсюдженням тріщини, якщо локальна інтенсивність напруги K_I перевищує K_{Ic} . Ерозія елемента відбувається, коли $\Delta K \geq K_{Ic}$ моделює інтенсивне фрагментування та утворює багато дрібних фрагментів.

Пластичні сталі часто утворюють адіабатичні смуги зсуву при високих швидкостях деформації, особливо на внутрішній поверхні оболонки, де радіальна деформація є найбільш інтенсивною. Локалізації зсуву згодом зливаються, що призводить до довгих кутових (45°) розломів в оболонці. Фрактографія виявляє гребені пластичної течії та пластичні зсуви.

Високоміцні високовуглецеві сталі можуть утворювати зони пошкодження мікротріщин на зовнішній поверхні оболонки під дією радіального навантаження.

При цьому, міжкристалітне або транскристалітне фрагментування може відбуватися, якщо мікроструктура містить грубі межі зерен або карбідні мережі, тоді як карбіди сплавів діють як концентратори напруги або точки «закріплення», обмежуючи пластичне ковзання та сприяючи утворенню мікротріщин при менших деформаціях.

Подрібнення зерна (менше d) збільшує площу межі зерна, підвищуючи ймовірність перетину мікротріщин і, таким чином, утворення більшої кількості дрібних фрагментів.

Карбідні виділення можуть ще більше зменшити ефективний розмір зерна з точки зору руйнування, посилюючи фрагментацію.

При лінійно-пружній механіці руйнування основною умовою крихкого фрагментування (режим I) є:

$$K_I = \sigma Y \sqrt{\pi a} \geq K_{Ic}$$

σ - чистий натяг, a - довжина тріщини, Y - геометричний коефіцієнт.



Нестабільність виникає, коли K_I перевищує K_{Ic} . Крім того, можна використовувати швидкість виділення енергії G при $G \geq G_c$, оскільки $G = K_I^2 / E'$ знаходиться у площинній деформації.

Експерименти часто показують, що кількість фрагментів N у порівнянні з масою m відповідає розподілам Мотта або Вейбулла. Двопараметрична форма Вейбулла:

$$N(> m) = \frac{M_0}{m\Gamma(1 + \frac{1}{\lambda})} \exp[-(m/m)^{\lambda}],$$

де m – параметр масштабу (характерна маса), λ – параметр форми, M_0 – загальна маса оболонки. Високоміцні крихкі сталі дають менше m (тобто багато дрібних фрагментів).

Таким чином, кратність елемента скінчено-елементної сітки має бути узгоджена із фізико-механічними характеристиками матеріалу оболонки, зокрема із параметром ударної в'язкості та корегуватись відповідно до експериментальних випробувань у комбінації із бризантним високоенергетичним матеріалом

Висновки. На основі проведеного аналізу та встановлених залежностей взаємодії матеріалу оболонки та високоенергетичного матеріалу визначено потенційну природу фрагментування виробу. В залежності від фізико-механічних характеристик матеріалу оболонкових конструкцій має бути застосований метод адаптації скінчено-елементної сітки для моделей Лагранжа-Ейлера.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Азюковський О.О., Гаркавенко Д.В., Грищак В.З., Зіборов К.А., Федоряченко С.О. Аналітичний підхід до розв'язку задачі нелінійної динаміки систем із змінними за часом параметрами в умовах реакції зовнішнього середовища.-Збірник наукових праць НГ -2023 - № 72 -С. 186-193.
2. Чумак Б. О., Нос О. М., Мішуков О. М. Аналіз похибок трьохпараметричних вимірювальних систем. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2014. № 3(16). С. 125-128.
3. Литовченко А.О., Хижняк В.В., Дмитрієв А.Г. Аналіз складових похибок траєкторних вимірювань натурних випробувань складних технічних об'єктів. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2020. - № 1(63). С. 68-73.



4. Petrov V.M., Shalygin A.A., Kudryavtsev A.F. A methodical approach to the solution of the aiming problem for dropping free-falling loads from unmanned aerial vehicles. Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine., 2020, 1(38), p. 84-90
5. Ольшанський В.П, Ольшанський С.В. Динаміка матеріальної точки у руховому повітряному середовищі. / *Ольшанський В.П, Ольшанський С.В.* // 2012.
6. Ольшанський В.П, Дубовик О.А. Питання зовнішньої балістики вогнегасних речовин./ *Ольшанський В.П, Дубовик О.А.* //-Х. Митець, 2005.-236 с.
7. Steele C. R. Asymptotic Analysis and Computation for Shells. Analytical and Computational Models of Shells / C. R. Steele // CED. – 1989. – Vol. 3. – P. 3–31.
8. Gaetan Kerschen. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. / Gaetan Kerschen, Keith Worden, Aleksander F. Vakakis, Jean-Claude Golinval. // Int. J. Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – 20. – P. 505 – 592.



Кирилаха С.В.¹, Акімов І.В.²

¹аспірантка, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: lanakirilaha@gmail.com

²доцент, канд. техн. наук, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: akimovi@ukr.net

КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ, ОТРИМАНИХ МЕТОДАМИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Анотація. Порівняно корозійну стійкість і міцність сплавів BT1-0 та BT20, виготовлених традиційною й адитивною технологіями. Виявлено зв'язок між корозійною тривкістю та мікроструктурою сплавів. Досліджено корозійну стійкість сплаву BT1-0, отриманого адитивними технологіями. Виявлено вплив внутрішніх дефектів порошкового матеріалу на підвищену швидкість корозії.

Ключові слова: титанові сплави; адитивні технології; корозійна стійкість; 3D наплавка.

Вступ. Титан і його сплави широко використовуються завдяки високій міцності, біосумісності та корозійній стійкості в усіх галузях промисловості. Адитивні технології (АТ) відкривають нові можливості для виробництва деталей із титану, забезпечуючи адаптивність, швидкість виготовлення та можливість створення складних конструкцій [1].

АТ особливо перспективні для виробництва компонентів, що працюють в агресивних середовищах, таких як хімічна та металургійна промисловості, завдяки високому коефіцієнту використання матеріалу та екологічності процесу. Водночас питання корозійної тривкості титанових сплавів, виготовлених адитивними методами, залишається недостатньо дослідженим [2].

Метою роботи є вивчення корозійної стійкості титанових сплавів, виготовлених адитивними методами, у розчині хлоридної кислоти та їх порівняння зі сплавами, отриманими традиційними технологіями.

Матеріал і результати досліджень. Авторами С. М. Лаврись та І. М. Погрелюк [3] було досліджено α - та псевдо- α -титанові сплави марки BT1-0 та BT20 (Ti–Al–Mo–V–Zr), виготовлені за традиційною та адитивною технологіями, з такими хімічними складами (wt%): BT1-0 – 0,25 Fe, 0,1 Si, 0,07 C, 0,04 N, 0,2 O, 0,01 H, решта Ti; BT20 – 5,5...7,0 Al, 1,5...2,5 Zr, 0,5...2,0 Mo, 0,8...2,5 V, 0,25 Fe, 0,15 Si, 0,1 C, 0,05 N, 0,15 O, 0,015 H, решта Ti,



згідно з ГОСТ 19807-91. Для адитивного виготовлення використовували електронно-променеве плавлення (ЕПП). Для ЕПП використовували вітчизняний титановий порошок технічної чистоти або легований (Ti–Al–Mo–V–Zr) несферичної форми, отриманий методом гідрування-дегідрування.

Мікроструктуру титанових сплавів вивчали на мікроскопі “Epiquant” з камерою та комп’ютерною приставкою. ДюрOMETричні дослідження проводились на мікротвердомірі ПМТ-3М з навантаженням 0,49 N на індентор Віккерса.

Для корозійних досліджень виготовляли зразки розмірами 12x12x2 mm. Корозійну швидкість визначали гравіметричним методом за зміною маси зразків після експозиції в агресивному середовищі. За 1440 h у HCl корозія титанових сплавів АТ інтенсивніша, ніж ТТ. Авторами [3] відзначено, що ТТ забезпечує нижчу корозійну тривкість сплаву BT1-0 (~ 2,5 рази), ніж сплаву BT20.

Сплави АТ мають вищі струми корозії, що свідчить про інтенсивнішу корозію та сповільнену пасивацію порівняно з ТТ. Різниця в потенціалі корозії між технологіями незначна, але найвищий потенціал спостерігається у сплаву BT1-0 (ТТ) завдяки стабільнішій пасивній плівці (табл. 1).

Таблиця 1 – Електрохімічні параметри для титанових сплавів, виготовлених за різними технологіями у 20%-му HCl [3]

Сплав	Технологія	$E_{\text{соп}}, \text{V}$	$i_{\text{соп}}, \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
BT1-0	ТТ	-0,3859	0,2424
BT1-0	АТ	-0,4427	0,3628
BT20	ТТ	-0,4876	0,0965
BT20	АТ	-0,4264	1,1058

Титанові сплави, виготовлені за АТ, мають гіршу корозійну тривкість через нерівноважну структуру (Відманштетта для BT1-0 та мартенситну α' -фазу для BT20), що спричиняє залишкові напруження та підвищену активність корозії. Натомість сплави ТТ з рівноважною структурою (α або $\alpha+\beta$) демонструють вищу стійкість до корозії.

Сплав BT20 (ТТ) має вищу корозійну тривкість завдяки вкрапленням ZrO_2 у пасивну плівку TiO_2 , що підвищує її цілісність. Натомість BT20 (АТ) поступається через відсутність β -фази та наявність метастабільної мартенситної α' -структури [3].

Згідно з [4] авторами проведено дослідження методом адитивного наплавлення, в результаті якого виготовлено зразки з титанового сплаву BT1-0. Для дослідження



використовувався перспективний неферичний порошок титану марки BT1-0 з фракцією $-160 + 40$ мкм, отриманий за технологією гідрування-дегідрування (HDH). Корозійні випробування проводили в 20% розчині HCl. Швидкість корозії визначали гравіметричним методом після 504 год експозиції при кімнатній температурі та доступі повітря. Швидкість корозії різних зон сплаву, виготовленого за адитивною технологією, показана на рисунку 1.

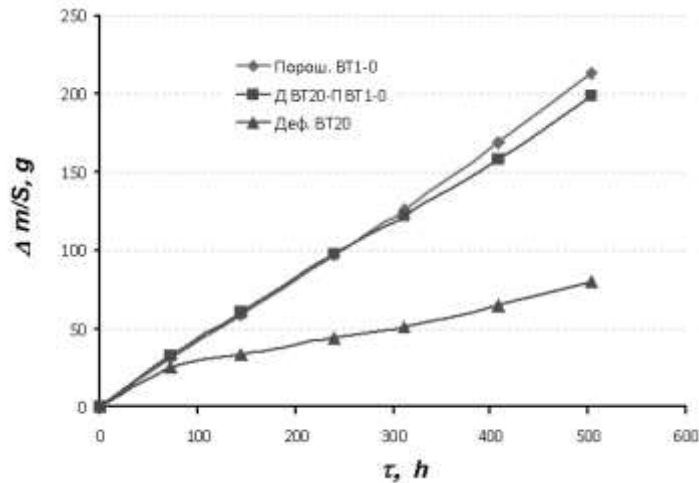


Рисунок 1 – Швидкість корозії на основі 504 годин різних зон зразка, наплавленого порошком BT1-0 на підкладку з деформованого сплаву BT20 за АТ [4]

Швидкість корозії зони порошкового наплавленого титану BT1-0 у 2,7 раза вища за зону сплаву BT20. Це пояснюється наявністю легувальних елементів, таких як Мо та V, у сплаві BT20, які зменшують схильність до корозійного руйнування, а також значною кількістю внутрішніх пор у BT1-0 [4].

Висновки. Титанові сплави, виготовлені за АТ, мають нижчу корозійну тривкість у 20%-му HCl порівняно зі сплавами ТТ через формування структури Відманштетта та метастабільного мартенситу під час ЕПП. Досліджено корозійну стійкість сплаву BT1-0, виготовленого адитивними технологіями. Встановлено, що швидкість корозії BT1-0 в 2,7 рази вища за показники деформованого сплаву BT20 та складає $0,394 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dutta, B., & Froes, F. H. (2017). The additive manufacturing (AM) of titanium alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 72, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2016.12.062>.
2. Kissel, H. (2021). Titanium powder and additive manufacturing: The perfect match. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 76, 196–198. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2021.06.002>.



3. С. М. Лаврись, І. М. Погрелюк, І. М., & Х. С. Шляхетка (2022). Корозійна тривкість адитивно виготовлених титанових сплавів у хлоридній кислоті. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 5, 23–29. [Physicochemical Mechanics of Materials, 5, 23–29].

4. Скребцов, А. А., Проскурняк, Р. В., Марченко, Ю. А., Шевченко, В. Г., & Омельченко, О. С. (2019). Вплив адитивних технологій на корозію титанових сплавів. *Металознавство та термічна обробка металів*, (3), 55–60.



В. О. Мельник

аспірант, фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАНУ,

Україна, e-mail: melnyk.vitalii@ipm.lviv.ua

ГРАНИЧНА РІВНОВАГА ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ІЗОТРОПНОГО ТІЛА ІЗ ЗАЛІКОВАНОЮ ДИСКПОДІБНОЮ ТРІЩИНОЮ

У статті досліджено граничний стан кругової тріщини в трансверсально-ізотропному матеріалі після ін'єкційного зміцнення. Розглянуто модель вінклерівської основи для опису напруженого стану. Отримано аналітичний вираз для граничного навантаження, що дозволяє оцінити ефективність заліковування тріщин та відновлення міцності конструкцій.

Ключові слова: трансверсально-ізотропне тіло, заліковування тріщин, міцність.

В інженерній практиці для відновлення несучої здатності пошкоджених тріщинами елементів конструкцій застосовують технологію ін'єкційного зміцнення [1]. Суть її полягає у введенні під тиском в пошкоджені зони тіла рідинних матеріалів, здатних після полімеризації чи кристалізації формувати з основним матеріалом міцні адгезійні зв'язки. Для оптимізації технології та оцінювання залишкового ресурсу роботоздатності відновлених елементів конструкцій виникає необхідність в розв'язуванні крайових задач про граничну рівновагу тіл із залікованими тріщинами. У доповіді наведено дослідження про граничний стан кругової тріщини в трансверсально-ізотропному матеріалі після застосування ін'єкційної технології зміцнення.

Розглянемо трансверсально-ізотропне тіло, що містить в площині ізотропії круглу в плані тріщину радіусом a . У віддалених від тріщини точках тіла прикладені зусилля розтягу, що викликають в площині тріщини за її відсутності однорідні напруження інтенсивністю p . Як відомо [2], міцність такого тіла, розрахована на основі $\delta\sigma$ -моделі [3] тіл з тріщинами, буде такою:

$$\begin{aligned} p_* &= \sigma_0 (2(1 - a_*/2a)a_*/a)^{1/2}, \quad \text{при } a \geq a_* \\ p_* &= \sigma_0, \quad \text{при } a < a_* \end{aligned} \quad (1)$$

Тут $a_* = \frac{\pi \delta_c B}{4 \sigma_0}$, $B = \frac{A_{44}(1+m_1)(1+m_2)(\sqrt{\nu_2} - \sqrt{\nu_1})}{m_2 - m_1}$, $m_i = \frac{A_{11}\nu_i - A_{44}}{A_{13} + A_{44}}$, ν_i - корені рівняння: $A_{11}A_{44}\nu^2 + (A_{13}(A_{13} + 2A_{44}) - A_{11}A_{33})\nu + A_{33}A_{44} = 0$, $i = 1, 2$, A_{11} , A_{13} , A_{33} , A_{44} - модулі пружності трансверсально-ізотропного тіла. Нехай в результаті застосування технології ін'єктування [1] поверхні тріщини з'єднані тонким прошарком ін'єкційного



матеріалу. Встановимо ефективність такого роду заліковування дефекту у тілі. Реакцію прошарку на зусилля розтягу подано відповідно до моделі вінклерівської основи

$$\sigma_{zz}^*(r) = U_z^*(r)E/h(r), \quad 0 \leq r \leq a \quad (2)$$

де E - модуль Юнга ін'єкційного матеріалу; $2h(r)$ - товщина прошарку; $u_z^*(r)$ - переміщення точок поверхні тріщини. Скориставшись принципом суперпозиції, напружений стан в тілі подамо як суму двох станів: тіла без тріщини під дією зовнішніх зусиль і тіла з тріщиною до поверхонь якої прикладені зусилля

$$\sigma_{zz}^\pm(r, 0) = -p + \sigma_{zz}^*(r), \sigma_{zz}^\pm = 0, \quad 0 \leq r \leq a \quad (3)$$

Під дією цих зусиль в околі тріщини формується кільцева зона $a < r \leq R$ послаблених зв'язків, в якій напруження вважаємо постійними і рівними σ_0 . Значення σ_0 змінюється в інтервалі від границі плинності σ_t до границі міцності σ_c .

Перший напружений стан не пов'язаний з тріщиною і тому не може впливати на її ріст. Поширення тріщини визначатиметься з розв'язку крайової задачі (3). Ця задача на основі загального розв'язку рівнянь рівноваги трансверсально-ізотропного тісла вираженого через гармонічні в різних системах координат функції з використанням інтегральних перетворень Ганкеля зведена до такого сингулярного інтегро-диференціального рівняння

$$\frac{2}{\pi} \int_0^R L(r, t) U_z'(t) dt = \frac{1}{B} \begin{cases} -p + \frac{U_z + U_0}{h} E, & 0 \leq r \leq a \\ -p + \sigma_0, & a \leq r \leq R \end{cases} \quad (4)$$

$$L(r, t) = \begin{cases} \frac{1}{r} K(t/r) + \frac{r^2}{t^2 - r^2} E(t/r), & t < r \\ \frac{t}{t^2 - r^2} E(r/t), & t > r \end{cases}$$

Тут $K(t/r)$, $E(t/r)$ - повні еліптичні інтеграли першого та другого роду відповідно; $U_z^* = U_z + U^0_z$; $U_z^0 = \frac{(A_{11} + A_{12})h(r)}{A_{33}(A_{11} + A_{12}) - 2A_{13}^2}$. Інтегральне рівняння (4) в загальному випадку може бути розв'язане чисельним методом з використанням функціональних поліномів. Якщо припустити, що напруження у прошарку не залежать від зони переддруйнування в околі тріщини, то можна отримати аналітичний розв'язок інтегрального рівняння (4) за умови, що $h = \sqrt{a^2 - r^2}/\beta$, де $\beta = a/c$; c - мала піввісь сфероїда $\frac{r^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$; Розкриття тріщини в точці $r = a$, як це впливає з отриманого розв'язку, буде таким

$$2U_z(a) = \frac{2a}{\pi B} \cdot \left(1 - \frac{a}{R}\right) (\sigma_0 + A), \quad A = \varepsilon E + \frac{2\beta(1 - \varepsilon E)E}{2\beta E + \pi B}$$

$$\varepsilon = \frac{A_{11} + A_{12}}{A_{33}(A_{11} + A_{12}) - 2A_{13}^2}$$



Параметр R , що характеризує зону передруйнування, встановлюється із умови плавного змикання берегів тріщини в точці $r = R$ і приймає таке значення

$$R = a \left(1 - \left(\frac{P - PA}{\sigma_0 - PA} \right)^2 \right)^{-1/2}$$

З умови δc - моделі, що $2UZ(a) = \delta c$, отримуємо рівняння для розрахунку граничного навантаження p^* для тіла із залікованою тріщиною

$$\frac{2a}{\pi B} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{p_* - p_* A}{\sigma_0 - p_* A} \right)^2} \right) (\sigma_0 - p_* A) = \delta c$$

Отримане рівняння має дійсний розв'язок

$$p_* = \frac{\sigma_0 \left(1 - \left(\frac{2a_*}{a} - 1 \right)^2 \right)}{A + \sqrt{A^2 - \left(\left(\frac{2a_*}{a} - 1 \right)^2 - 1 \right) (1 - 2A)}}$$

при умові, що

$$a > \frac{2a_*}{1 + \sqrt{1 + \frac{A^2}{1-2A}}}$$

Випадок $A = 0$ відповідає незалікованій тріщині і із співвідношень (8), (9) отримуємо рівняння (1). Із співвідношення (6) видно, що якщо зовнішні навантаження досягають напружень інтенсивності $p = \sigma_0$, параметр прямує в нескінченність. Тоді із формули (5) в цьому разі для тріщин розміром $a < a_0$ отримаємо

$$2u_z(a) = \frac{2a}{\pi B} \sigma_0 (1 - A) < \frac{2a_0}{\pi B} \sigma_0 (1 - A) = \delta c \quad (10)$$

Тут введено позначення $a_0 = 2a_* / \left(1 + \sqrt{1 + \frac{A^2}{1-2A}} \right)$. Співвідношення (10) показує, що для тріщин розміром $a < a_0$ граничний стан тіла згідно δc -концепції не настає навіть у випадках, коли $p = \sigma_0$.

Тіло з такими дефектами має таку ж міцність, як і бездефектне, тобто $p_* = \sigma_0$. Варто підкреслити, що згідно зі співвідношеннями (10), заліковані тріщини, які більше не знижують міцність, можуть бути значно більшими за незаліковані дефекти. Це вказує на те, що правильний вибір параметрів ін'єкційного матеріалу дає змогу повністю відновити міцність тіла навіть за наявності тріщини критичних розмірів.

Цю роботу виконано в рамках проекту № 2023.04/0132 Національного фонду досліджень України.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Panasyuk V. V., & Marukha V. I., & Sylovanyuk V. P. (2014) Injection Technologies for the Repair of Damaged Concrete Structures. Springer
2. Зайцев Г. П. (1977). К вопросу о предельном равновесии пластин и тел из хрупких ортотропных материалов с трещинами. Проблемы прочности, (13), 78-83.
3. Панасюк В. В. (1968). Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Наукова думка.



Трач Володимир¹, Подворний Андрій², Жукова Наталія³

¹завідувач кафедри мостів і тунелів, опору матеріалів і будівельної механіки,
д.т.н., професор, Національний університет водного господарства та
природокористування, Україна, email: v.m.trach@nuwm.edu.ua

² професор кафедри мостів і тунелів, опору матеріалів і будівельної механіки, д.т.н.,
доцент,
Національний університет водного господарства та природокористування, Україна, e-
mail: a.v.podvorny@nuwm.edu.ua

³старший науковий співробітник відділу обчислювальної механіки та техніки,
к.ф.-м.н., старший науковий співробітник, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка
НАН України, Україна, email: zukowa_n@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ ВАРІАЦІЙНОГО ПРИНЦИПУ ХУ – ВАСІДЗУ В ЗАДАЧАХ СТІЙКОСТІ НЕТОНКИХ АНІЗОТРОПНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК З КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ В ПРОСТОРОВІЙ ПОСТАНОВЦІ

В роботі, представлено підхід до отримання просторової системи диференціальних рівнянь стійкості в частинних похідних теорії пружності анізотропного тіла, при використанні варіаційного принципу Ху – Васідзу. Приведення отриманої системи до одновимірної проведено з використанням аналітичного методу Бубнова – Галеркіна. Досліджено стійкість нетонких циліндричних оболонок з композитних матеріалів, що включають функціонально-градієнтні матеріали.

Ключові слова: варіаційний принцип Ху – Васідзу, циліндрична оболонка, стійкість, функціонально-градієнтні матеріали.

Вступ. Розв’язання задач теорії пружності та будівельної механіки тісно пов’язане із використанням варіаційних принципів [7, 8], за допомогою яких можливо створити нові несуперечливі моделі розрахунку оболоноквих конструкцій. Класичні та уточнені теорії розрахунку оболоноквих конструкцій, створені також із використанням варіаційних методів [2, 3, 5], дозволяють отримувати достовірні результати розв’язку задач напружено-деформованого стану, стійкості та динаміки анізотропних оболонок. Однак, використання в сучасній техніці новітніх композитних матеріалів призводить до зростання вимог щодо побудови математичних моделей і, відповідно, до необхідності застосування більш точних підходів до розрахунків. Так широке використання



функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ) в різних галузях сучасної техніки вимагає створення підходів, що дозволяли б найповніше враховувати особливості таких матеріалів під різними видами впливів. Використання ФГМ в якості матеріалу оболонкових конструкцій потребує врахування зміни їх структури, наприклад, за товщиною, що можливе при використанні співвідношень просторової теорії пружності.

Розв'язанню задач стійкості оболонкових конструкцій з ізотропних та ортотропних матеріалів у тривимірній постановці присвячена значна кількість робіт. Серед них найповнішою та узагальнюючою є наукова праця [4]. Водночас, використання сучасних композитних матеріалів потребує удосконалення методів розв'язку таких задач. Це може бути пов'язане з неспівпадінням головних напрямів пружності між власними осями попередньо ортотропного матеріалу та криволінійною системою координат оболонок. Складність створення підходів до розрахунку подібних оболонкових конструкцій спричинена взаємозв'язком деформацій розтягу (стиску) та зсуву, вигину та кручення, що призводить до складніших, порівняно з ортотропними, рівнянь стійкості [1, 6].

В роботі приведено підхід до модифікації функціонала узагальненого варіаційного принципу Ху – Васідзу до виду, що враховує особливості сучасних матеріалів і ґрунтується на співвідношеннях теорії пружності анізотропного тіла. Пружні властивості таких матеріалів характеризуються наявністю однієї площини пружної симетрії.

Матеріал і результати досліджень. Відповідно до варіаційного принципу Ху – Васідзу [8] рівняння стійкості, співвідношення пружності, геометричні співвідношення та відповідні граничні умови можуть бути отримані з умови стаціонарності функціоналу Π_1 , що визначається з інтегралу:

$$\Pi_1 = \iiint_V \left\{ W(e_{ij}) + \Phi(u_i) - \sigma_{ij} \left[e_{ij} - \frac{1}{2}(u_{i;j} + u_{j;i}) \right] \right\} dV + \iint_{S_1} \Psi(u_i) dS_1 - \iint_{S_2} p_i (u_i - \bar{u}_i) dS_2. \quad (1)$$

В (1), без додаткових умов, варіюються переміщення u_i , деформації e_{ij} , напруження σ_{ij} , напруження p_i на поверхні S_2 , що викликані переміщеннями $\bar{u}_i$. Також в цьому функціоналі $W(e_{ij})$ – потенціальна енергія деформації, $\Phi(u_i)$, $\Psi(u_i)$ – потенціали об'ємних і поверхневих навантажень, V – об'єм матеріалу оболонки.

Після послідовності математичних перетворень, що включають в себе операцію варіювання отримано лінеаризовану систему диференціальних рівнянь стійкості для анізотропних циліндричних оболонок в просторовій постановці.



З метою приведення тривимірної задачі до одновимірної використано процедуру аналітичного методу Бубнова – Галеркіна [6]. Згідно з нею, розкладемо всі компоненти напружень і переміщень системи рівнянь стійкості в подвійні тригонометричні ряди за координатою вздовж твірної z так, щоб вони задовольняли граничним умовам на торцях, а також врахуємо їх періодичність за коловою координатою φ .

Розв'язок одновимірної системи диференціальних рівнянь проводився при використанні чисельного методу дискретної ортогоналізації.

Була розглянута задача порівняння величин критичних навантажень анізотропної циліндричної оболонки, виготовленої з попередньо ортотропного волокнистого матеріалу боропластику з такою ж, але із зовнішнім шаром з кераміко-металевого функціональноградієнтного матеріалу. Обидві оболонкові конструкції знаходились під дією розподіленого зовнішнього тиску. Головні напрямки пружності боропластику та ФГМ можуть бути повернуті на кут α відносно напрямку твірної оболонки. Температура матеріалів була прийнята незмінною і такою, що відповідає температурі вихідного недеформованого стану конструкцій $t=293^\circ\text{K}$.

Висновки. В роботі, спираючись на варіаційний принцип Ху – Васідзу, отримано тривимірну систему диференціальних рівнянь, що описує стійкість циліндричної анізотропної оболонкової конструкції. Приведення системи до одновимірної здійснюється при використанні розкладів у подвійні тригонометричні ряди Фур'є. При цьому апроксимація невідомих уздовж твірної та за коловим напрямком оболонкової конструкції проводиться при використанні аналітичного методу Бубнова – Галеркіна.

Застосування запропонованого підходу дозволяє розв'язувати задачі стійкості для шаруватих оболонкових конструкцій, при виготовленні яких використано сучасні композитні матеріали, у тривимірній постановці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Амбарцумян, С. (1974). *Общая теория анизотропных оболочек*. М.: Наука.
2. Баженов, В., Семенюк, М. & Трач, В. (2010). *Нелінійне деформування, стійкість і закритична поведінка анізотропних оболонок: монографія*. К.: Каравела.
3. Григоренко, Я. & Крюков, Н. (1988). *Численные решения задач статики гибких слоистых оболочек с переменными параметрами*. К.: Наук. думка.



4. Гузь, А. & Бабич И. (1985). *Трёхмерная теория устойчивости деформируемых тел. Пространственные задачи теории упругости и пластичности*. К.: Наук. думка.
5. Трач, В., Подворний, А. & Хоружий М. (2019). *Деформування та стійкість нетонких анізотропних оболонок: монографія*. К.: Каравела.
6. Semenyuk, N., Trach, V. & Podvornyi, A. (2023). Stress–strain state of a thick-walled anisotropic cylindrical shell, *International Applied Mechanics*, 59 (1), 79–89.
7. Tonti, E. (1967). Variational principles in elastostatics. *Meccanica*, (2), 201–208.
8. Washizu, K. (1982). *Variational Methods in Elasticity and Plasticity*. Pergamon Pr; Subsequent edition.



Володимир Трач¹, Микола Хоружий²

¹завідувач кафедри мостів і тунелів, опору матеріалів і будівельної механіки,
доктор технічних наук, професор, Національний університет водного господарства
та

природокористування, Рівне, Україна, e-mail: v.m.trach@nuwm.edu.ua

²доцент кафедри мостів і тунелів, опору матеріалів і будівельної механіки,
кандидат технічних наук, доцент, Національний університет водного господарства
та природокористування, Рівне, Україна, e-mail: m.m.khoruzhyi@nuwm.edu.ua

СТІЙКІСТЬ НЕТОНКИХ АНІЗОТРОПНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК, ЗАХИЩЕНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИМ МАТЕРІАЛОМ, ПІД ДІЄЮ БОКОВОГО ТИСКУ

Анотація. У роботі представлено підхід до розрахунку на стійкість нетонких анізотропних циліндричних оболонок, що захищені функціонально-градієнтним матеріалом, під дією бокового тиску. Приведені залежності впливу кута укладання шаруватого волокнистого композита на величини критичних значень зовнішнього тиску. Проаналізований ефект збільшення кількості укладених шарів на стійкість оболонок.

Ключові слова: анізотропія, циліндрична оболонка, стійкість, композит, функціональноградієнтний матеріал.

Вступ. Тонкостінні конструкції на основі композитних матеріалів знайшли широке застосування в різних сферах сучасної техніки. Зокрема, авіаційна та ракетобудівна промисловість активно використовує легкі, але , в той же час, міцні композиційні оболонки. Проте традиційні композити мають обмеження – при впливі високих температур їх несуча здатність може знижуватися. Найчастіше вона пов’язана із втратою стійкості. Одним із можливих рішень є застосування термостійкої кераміки, проте вона має суттєві недоліки, зокрема крихкість і чутливість до згину та кручення, що ускладнює її використання в навантажених конструкціях.

Останніми роками було розроблено новий клас матеріалів – функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ) [8]. Вони являють собою композити з плавним переходом між різними складовими фазами, зазвичай поєднуючи кераміку та метал. Завдяки своїм властивостям кераміка забезпечує високу термостійкість, тоді як металеві компоненти



підвищують механічну міцність і знижують ризик руйнування. Використання ФГМ дає змогу ефективно захищати оболонкові конструкції від температурних навантажень, дозволяючи їм зберігати необхідні експлуатаційні характеристики навіть у складних умовах.

На сьогоднішній день проведено ґрунтовне дослідження напружено-деформованого стану як тонкостінних, так і відносно товстих циліндричних оболонок, виготовлених зі функціонально-градієнтних матеріалів [6-10]. Проте, залишається ще досить значна кількість нез'ясованих питань щодо стійкості таких анізотропних оболонок.

Методика досліджень. У даній роботі розглядається стійкість шаруватої циліндричної оболонки, що складається з волокнистого композиту, укладеного під певним кутом до твірної ψ , та шару з функціонально-градієнтного матеріалу (рис. 1).

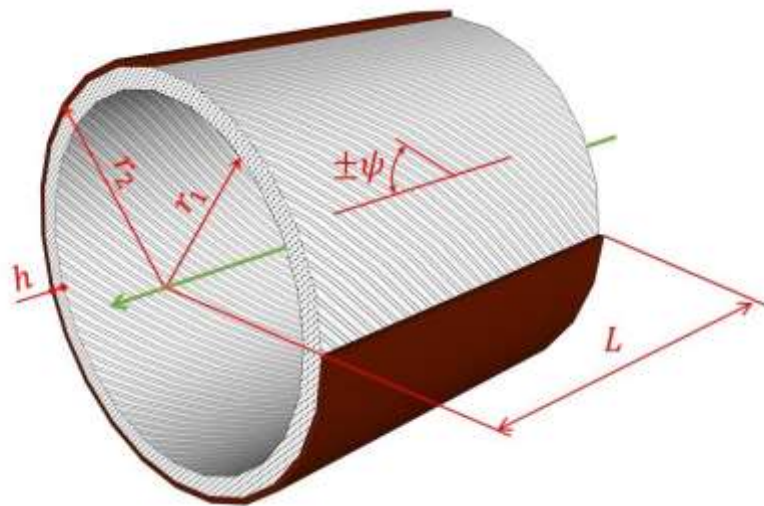


Рисунок 1 – Циліндрична анізотропна оболонка

Такий спосіб влаштування анізотропної оболонки дозволяє вважати, що найнижчий рівень симетрії композитного шару складає наявність однієї площини, в якій механічні властивості симетричні. Методика розрахунку та результати дослідження стійкості анізотропних оболонок обертання, що виготовлені з композитних матеріалів з однією площиною пружної симетрії детально представлені в монографіях [1, 2, 5].

У роботі пропонується підхід до розрахунку на стійкість нетонких анізотропних циліндричних оболонок, що захищені функціонально-градієнтним матеріалом за використання уточненої теорії типу Тимошенко [2-4].

Для побудови рівнянь, за допомогою яких визначається критичний стан оболонок, пов'язаний з явищем біфуркації, використана канонічна система рівнянь нелінійного деформування симетрично завантажених нетонких анізотропних оболонок.

Задача статичної стійкості симетрично завантаженої пружної анізотропної оболонки обертання зведена до системи з десяти звичайних однорідних диференціальних рівнянь у нормальній формі із змінними коефіцієнтами і однорідними граничними умовами.

Методика розв'язку, розглядуваної крайової задачі, базується на чисельному методі дискретної ортогоналізації. Чисельна методика розрахунку поставленої задачі реалізована у вигляді пакету програм для РС.

Об'єкт і результати досліджень. Об'єктом дослідження було вибрано циліндричну оболонку виготовлену з шарів волокнистого матеріалу боропластик та шару функціональноградієнтного матеріалу під дією розподіленого зовнішнього тиску [10]. В якості керамічної складової ФГМ вибрано нітрид силікону, а металевої – титан (Ti-6Al-4V). Об'ємний показник фракції змішуваних матеріалів прийнятий $N=1$ [8]. Фізико-механічні властивості функціонально-градієнтної складової циліндра, а також боропластику представлені в [10].

Розглядалась циліндрична оболонка з такими геометричними параметрами (див. рис.1): $L=1.2$ м, $r_1=0.57$ м, $r_2=0.63$ м, $h=0.06$ м. Було розраховано три варіанти циліндричної оболонки (рис. 2).

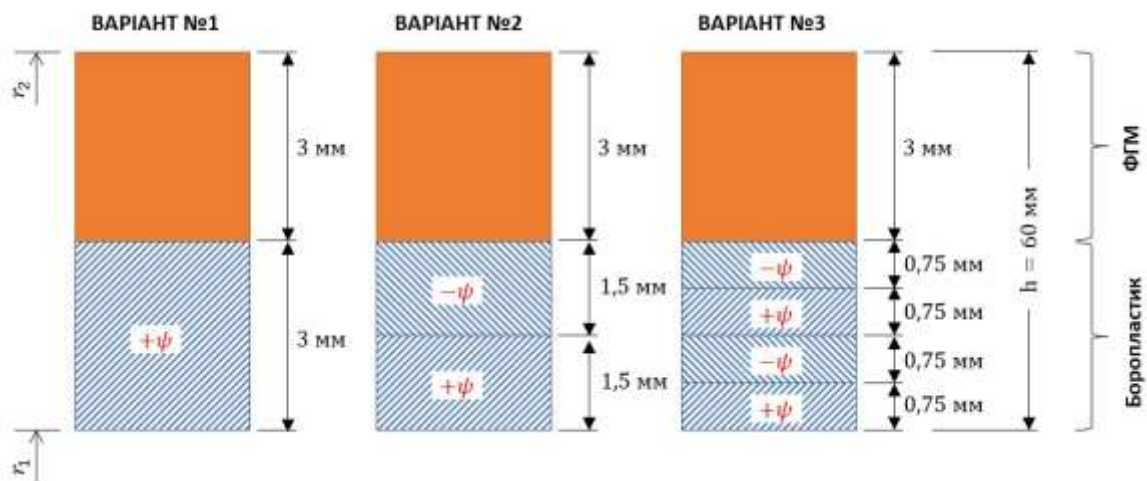


Рисунок 2 – Варіанти конструкції циліндричної анізотропної оболонки

При розрахунку на стійкість знаходились мінімальні значення критичного бокового тиску q_{cr} , а також відповідне колове хвилеутворення n . Результати розрахунку

представлені у вигляді графіків, що ілюструють вплив кута укладання шаруватого волокнистого композита ψ на величини критичних значень зовнішнього тиску.

Висновки. В роботі за використання запропонованої методики проведені чисельні розрахунки на стійкість нетонких анізотропних циліндричних оболонок, захищених функціонально-градієнтним матеріалом, під дією бокового тиску. Приведені залежності впливу кута повороту головних напрямків пружності волокнистого матеріалу на величини критичних значень бокового тиску. Також проаналізований ефект збільшення кількості укладених шарів на стійкість оболонки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баженов, В.А., & Семенюк, М.П., & Трач, В.М. (2010). Нелінійне деформування, стійкість і закритична поведінка анізотропних оболонок. Київ: Каравела.
2. Трач, В.М., & Подворний, А.В., & Хоружий, М.М. (2019). Деформування та стійкість нетонких анізотропних оболонок: монографія. Київ: Каравела.
3. Трач, В.М., & Хоружий, М.М. (2014). Стійкість анізотропних циліндричних оболонок під дією осьового стиску. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць, (28), 421–428.
4. Трач, В.М., & Семенюк, М.П., & Хоружий, М.М. (2018). Стійкість нетонких тришарових анізотропних циліндричних оболонок під дією зовнішнього тиску. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць, (72), 73–81.
5. Амбарцумян, С.А. (1975). Общая теория анизотропных оболочек. Наука.
6. Reddy, J.N. & Chin, C.D. (1998). Thermoelastical analysis of functionally graded cylinders and plates. Journal of Thermal Stresses, (21), 593–626.
7. Shahsiah, R. & Eslami, M.R. (2003). Thermal buckling of functionally graded cylindrical shell. Journal of Thermal Stresses, (26), 277–294.
8. Shen, Hui-Shen. (2009). Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York.
9. Shen, Hui-Shen. (2005). Postbuckling of axially-loaded FGM hybrid cylindrical shells in thermal environments. Composites Science and Technology (65), 1675–1690.
10. Semenyuk, N.P., & Trach, V.M., & Podvornyi, A.V. (2020). Stress-strain state of thickwalled anisotropic cylindrical shells under thermal power load, protected by the functionally graded material. Strength of Materials and Theory of Structures, (104), 192–206.



Юрій Міхлін¹, Юлія Сурганова², Денис Федотов³

¹професор, д.ф.-м.н., професор, Національний Технічний Університет «ХПІ»,
Харків, Україна, e-mail: Yuri.Mikhlin@gmail.com

²доктор філософії, асистент, Національний Технічний Університет «ХПІ»,
Харків, Україна, e-mail: surganova.julia@gmail.com

³студент, Національний Технічний Університет «ХПІ», Харків, Україна, e-mail:
denys.fedotov@infiz.khpi.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З ДВОРІВНЕВОЮ АМОРТИЗАЦІЄЮ

Анотація. Розглядається динаміка спеціалізованого транспортного засобу, що має три рівні: базову підвіску, вантажну платформу (або демпферну панель) і віброізоляційний об'єкт. Кузов автомобіля і додаткова демпферна панель над кузовом моделюються прямолінійними жорсткими пластинами у формі паралелепіпеда.

Ключові слова: підвіска автомобіля, демпферна панель, власні частоти, моди коливань, продовження за параметром.

Вступ. Оцінка динамічного стану транспортного засобу має важливе значення для проєктування систем, які підвищують характеристики безпеки та керування цих засобів. Транспортний засіб можна моделювати як складну динамічну систему з кількома степенями свободи. Часто дослідники обмежуються найпростішими моделями транспортного засобу, а саме, моделлю «чверті машини» (система з двома степенями свободи) для дослідження качки, або модель «напівмашини» (система з чотирма степенями свободи) для вивчення вертикальних рухів, качки та тангажу. Але значного поширення набула також модель з 7 степенями свободи, що дає змогу більш повно описати динаміку автомобіля, враховуючи динаміку коліс [1-3]. Коректність цієї моделі обґрунтовано порівнянням з експериментами.

У представлений роботі проведено модальний аналіз багатомасової системи, що представляє собою модель підвіски автомобіля, яка включає в себе як кузов автомобіля (що дозволяє описати вертикальні і похилі переміщення), так і його невіднесорені маси (що дозволяє включити в дослідження зміщення коліс). До підвіски додано панель-амортизатор, що розміщена над цією панеллю. Основна мета полягала в дослідженні мод коливань отриманої системи, як в лінійному наближенні, так і з врахуванням



нелінійності в пружних елементах системи, що дозволяє краще зрозуміти механізми взаємодії кузова і підвіски автомобіля, а також панелі-амортизатора при різних режимах коливань. Такий аналіз може бути вельми корисним за наявності зовнішніх впливів.

Матеріал і результати досліджень. Досліджувану модель автомобіля (Рис. 1) можна умовно поділити на декілька складових частин, таких як непідресорені та підресорені маси, пружні і демпфуючі елементи. Вважаємо, що кузов, який моделюється жорсткою пластиною у вигляді паралелепіпеда, а також нижні, непідресорені маси, складають так званий *перший рівень* загальної моделі. Тут непідресорені маси – це колеса та елементи підвіски, які з'єднуються з кузовом через систему амортизаторів і пружин, що дозволяють поглинати і пом'якшувати дорожні нерівності. Так званий *другий рівень* представлено у вигляді додаткової панелі-амортизатора, що знаходиться над кузовом. Вона також моделюється жорсткою пластиною у вигляді паралелепіпеда, причому вважаємо, що геометричні розміри верхньої панелі-амортизатора менше, ніж розміри нижньої. *Третій рівень* це вантаж різного походження, який розміщено на панелі-амортизаторі, і який тут не представлено. Обмежуючись аналізом мод коливань, не враховується взаємодія транспорту та дорожнього покриття. Зазначимо, що в даній системі присутня значна дисипація.

На рис. 2 показана спрощена динамічна модель взаємодії кузова автомобіля та непідресорених мас із зображенням відповідних координат.

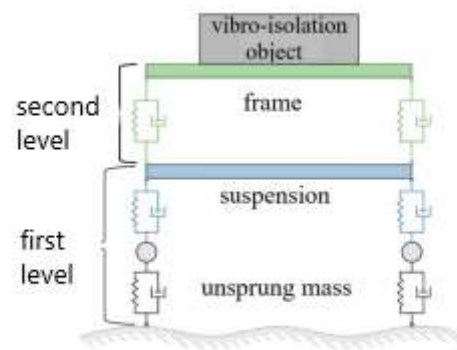


Рисунок 1 – Загальна схема транспортного засобу з двома рівнями підвіски



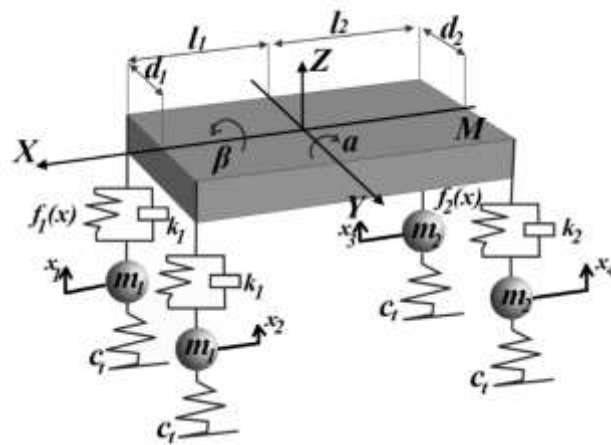


Рисунок 2 – Спрощена модель взаємодії кузова автомобіля та невіднесених мас

Система, що розглядається, має 10 ступенів свободи. На першому етапі, як для важкого за масою, так і для легкого автомобілів, отримано власні частоти та моди коливань системи в лінійному наближенні. Оцінено, наскільки значними є амплітуди коливань для різних узагальнених координат. Далі проведено дослідження мод коливань з врахуванням нелінійності в пружних характеристиках транспортного засобу. Нелінійні моди коливань [4] отримано як шляхом чисельного моделювання, так і з використанням концепції Шоу-П'єра.

Висновки. Проведене дослідження демонструє наявність декількох мод коливань з різним розподілом амплітуд між узагальненими координатами, що вказує на комплексну взаємодію кузова і коліс автомобіля в підвісці та пластини-амортизатора. Це підтверджує складну природу коливальних процесів в автомобільній підвісці та відкриває перспективи для подальшої оптимізації конструкції і настройки підвісок з метою поліпшення динамічних характеристик автомобіля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kim Hyo-Jun, Yang H. S., Park Young-Pil (2002) Improving the vehicle performance with active suspension using road-sensing algorithm. *Computers and Str.* (80), 1569–1577.
2. Hemantha K. et al. (2021) Study the dynamic behaviour of seven DOF of full car model with semi-active suspension system. *Int. J. Vehicle Performance*, 7 (1/2), 21-40.
3. Palli S., Sharma R. C. (2072) Dynamic behaviour of a 7 DoF passenger car model // *Int. J. Vehicle Structures & Systems*, 9(1), 57–63.
4. Mikhlin Y., Avramov K. (2024) Nonlinear Normal Modes of Vibrating Mechanical Systems: 10 Years of Progress. *Appl. Mech. Rev.*, 76(5), 050801.



О.В. Федоскіна¹, М.М.Єрісов², В.О.Федоскін³

¹доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну НТУ

«Дніпровська політехніка», e-mail: fedoskina.o.v@nmu.one

²асистент кафедри автомобілей і автомобільного господарства НТУ

«Дніпровська політехніка», e-mail: erisov@ukr.net

³доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства НТУ

«Дніпровська політехніка», e-mail: fedoskin_va@ukr.net

РЕГУЛЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ СИЛОВИЙ ВПЛИВ НА МАТЕРІАЛ У ВІБРАЦІЙНІЙ ЩОКОВІЙ ДРОБАРЦІ З ПОХИЛОЮ КАМЕРОЮ ДРОБЛЕННЯ

Анотація. Виробництво дрібнозернистих матеріалів з необхідними характеристиками є складним технологічним процесом. При цьому остаточні характеристики матеріалу формуються здебільшого на останній стадії в щоккових, валкових дробарках або барабанних і вібраційних млинах. Представлено розрахункову схему інноваційного зразка вібраційної щоккової дробарки, розглядаються динамічні та конструктивні параметри, що визначають силову дію на матеріал і суттєво впливають на режим роботи.

Ключові слова: коливання, дробарка, параметри, силовий вплив

Вступ. Ефективність ведення технологічних процесів з використанням дрібнозернистих і порошкових матеріалів істотно залежить від їхніх характеристик, до яких відносяться форма, розмір частинок, гранулометричний склад, питома поверхня, насипна вага, вологість та ін. Отримання таких матеріалів із заданими характеристиками являє собою технологічно багатостадіальний і енергоємний процес з використанням великої кількості дробильно-сортувального обладнання. Управління процесом дезінтеграції матеріалу базується на наявних у дробильно-сортувальному обладнанні регулюючих параметрів, що істотно впливають на характер взаємодії дроблячих щік з матеріалом. Основні характеристики матеріалу забезпечуються на останній стадії технологічного процесу, де для отримання дрібнозернистого продукту можуть бути задіяні щоккові або валкові дробарки, кульові барабани та вібраційні млини, а також новий клас подрібнювачів - вібраційні щоккові дробарки з похилою камерою дроблення.



У щоківих і валкових дробарках матеріал руйнується за допомогою стиснення, а силовий вплив на матеріал регулюється в основному шириною розвантажувальної щілини і профілем робочої поверхні. Кінцевим продуктом є дрібнозернистий матеріал крупністю ≥ 1 мм. Основним регулювальним параметром кульових млинів є маса куль, що визначають ударний характер руйнування матеріалу. Набір регулювальних параметрів значно більший у вібраційній щоківій дробарці з похилою камерою дроблення [2].

Матеріал і результати досліджень. Дослідження проводили на вібраційній щоківій дробарці з похилою камерою дроблення (рис.1).

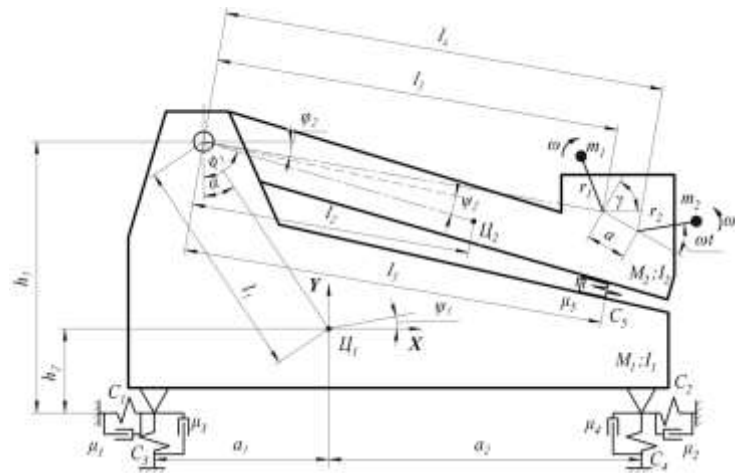


Рисунок 1- Розрахункова схема подрібнювача

Конструктивно дробарка має дві щоки: активну щоку 1 масою M_2 , встановлену на осі підвісу 2 з можливістю повороту на кут ψ_2 , і пасивну щоку 3 масою M_1 , що виконує функцію корпусу дробарки. Щоки пов'язані між собою пружним елементом 4, а корпус дробарки розташований на пружних елементах 5. Активна щока забезпечена двохвальним інерційним приводом 6. Дроблення здійснюється високочастотним ударним впливом активної щоки на матеріал під час переміщення його по робочій поверхні пасивної щоки[1].

Отримано диференціальні рівняння, що описують рух елементів дробарки та дають змогу визначити фактори, які суттєво впливають на її режим роботи.

Частота коливань щік. Висока частота коливань щік є відмінною особливістю вібраційної щоківій дробарки. У разі використання інерційного віброзбуджувача, виходячи з надійності роботи підшипникових вузлів, раціональна частота коливань приймається 15...25Гц. Цей параметр встановлює кількість ударів, одержуваних шматком матеріалу в період проходження камери дроблення. Частота коливань щік легко регулюється і може переналаштовуватися в процесі роботи залежно від зміни



фізико-механічних властивостей матеріалу. Від частоти коливань активної щоки істотно залежать як динамічні, так і технологічні показники подрібнювача.

Величина збурювальної сили. Під час зміни кутової швидкості обертання ω дебалансних вантажів, крім зміни частоти коливань щік, змінюється збурювальна сила віброзбуджувача, яку можна регулювати за допомогою зміни маси m_1 і m_2 невідновленої частини дебалансних вантажів у процесі налаштування режиму роботи дробарки на подрібнення конкретних матеріалів.

Напрямок збурювальної сили. Положення віброзбуджувача дає напрямок вектора сили, що збурює, яка утворює з горизонтальною площиною кут γ . Конструктивно, за допомогою повороту віброзбуджувача, досить просто забезпечити зміну кута γ в інтервалі $0 \leq \gamma \leq \pi/2$.

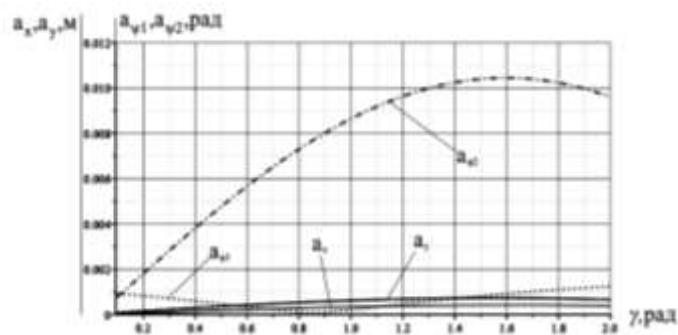


Рисунок 2 - Залежність амплітуд коливань елементів дробарки від напрямку вектору збурювальної сили віброзбуджувача

Зміна вектора збурювальної сили незначно впливає на амплітуду коливань пасивної щоки (a_x , a_y , $a_{\psi 1}$), якщо порівняти з коливаннями ($a_{\psi 2}$) активної щоки. Це дає змогу регулювати силовий вплив на матеріал за незмінної швидкості його переміщення.

Центр мас пасивної щоки. Робоча поверхня пасивної щоки, що коливається, є елементом дробарки, що забезпечує транспортування матеріалу в процесі його руйнування і зменшення крупності. Розглянуто спосіб керування амплітудою коливання щік за допомогою зміщення центру мас пасивної щоки вздовж осі X (рис.1). Конструктивно пасивна щока виконується з витягнутою вздовж осі X порожниною, в якій розташований баластний елемент масою, порівнянною з M_1 . Отримані залежності коливань щік мають нелінійний характер і дають змогу вибрати раціональне співвідношення між швидкістю транспортування і силовим впливом на матеріал.

Кут нахилу камери дроблення. При регулюванні швидкості руху матеріалу динамічними параметрами дробарки змінюється також і амплітуда коливань активної щоки, що вимагає раціонального співвідношення змінюваних параметрів. Швидкість транспортування матеріалу, зі збереженням встановлених кількісних характеристик



силового впливу, може регулюватися зміною кута нахилу камери дроблення в процесі настроювання, а також під час роботи дробарки.

Висновки. Вібраційна щокочна дробарка з похилою камерою дроблення має значну кількість регульованих параметрів. Зміна амплітуди коливань активної щочки в широких межах дозволяє вести технологічний процес з необхідною дозованим навантаженням для конкретного матеріалу з урахуванням його фізико-механічних властивостей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ (ВІДПОВІДНО ДО АРА)

- 1 Франчук В.П., Федоскіна О.В. (2010). *Вібраційна щокочна дробарка* (Патент України 89439).
2. Franchuk, V., Fedoskina, O., Yerisov, M. & Fedoskin, V. (2023). Innovative technology for obtaining fin-grain and powder material. *Key trends of integrated innovation-driven scientific and technological development of mining regions: monograph*, 373-386. <https://doi.org/10.31713/m1217>



Мачульський Валерій Борисович, Горобець Василь Андрійович
 аспірант, Київський національний університет технологій та дизайну, Київ,
 Україна, e-mail: machulskyi.vb@knuatd.edu.ua
 доцент, кандидат технічних наук, Київський національний університет
 технологій та дизайну, Київ, Україна, e-mail: horobets.vs@knuatd.edu.ua

СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ПРОСТОРОВИХ ВАЖІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ

Анотація. В роботі розглянуті питання особливості структурного аналізу просторових важільних механізмів із застосуванням сімейства формул Сомова-Малишева. Виконаний структурний аналіз розроблених авторами просторових п'ятиланкових важільних механізмів зі складною траєкторією руху веденої ланки.

Ключові слова: формула Сомова-Малишева, кінематичний ланцюг, кінематична пара, ступінь вільності, загальний механічний зв'язок.

Вступ. Важільні механізми на даний час продовжують залишатись важливою складовою сучасного промислового обладнання. Так, машини нового покоління все частіше перетворюються на складні мехатронні системи. Але, хоча широке застосування крокових двигунів, прямих приводів тощо суттєво скоротили кінематичні ланцюги їх механізмів, для передачі руху безпосередньо робочим органам в багатьох випадках без важільних механізмів, як плоских, так і просторових, не обійтись, особливо коли траєкторія робочого органу має складну форму, а рух необхідно передати в просторі.

Просторові важільні механізми є основною складовою окремих груп роботів та маніпуляторів [1, 2], широко застосовуються в обладнанні галузей легкої промисловості, сільськогосподарських машинах [3], підйомно-транспортних пристроях тощо.

Однак, якщо в першому випадку ці механізми застосовуються у вигляді відкритих кінематичних ланцюгів, число ступенів вільності яких залежить від кількості приводів, то в решті випадків вони використовуються у вигляді простих чи складних замкнених кінематичних ланцюгів, ступінь вільності яких дорівнює одиниці. Тому при їх розробленні та структурному аналізі необхідно для підтвердження працездатності механізму визначити цей показник.

Матеріал і результати досліджень. В більшості підручників та наукових робіт з теорії машин і механізмів ступінь вільності просторового механізму пропонується визначити за формулою Сомова Малишева:



$$W = 6(n - 1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1$$

де n – число ланок механізму; p_i – клас відповідної кінематичної пари (від 2-х до 5).

Однак, в такому вигляді ця формула може бути справедлива тільки в механізмах, де на їх ланки не накладені загальні механічні зв'язки. Навіть для шарнірного просторового чотирьохланковика (рис. 1а), що має дві обертальні та дві сферичні пари і є основою багатьох просторових важільних механізмів, вона не працює:

$$W_1 = 6(4 - 1) - 5 \cdot 2 - 3 \cdot 2 = 2$$

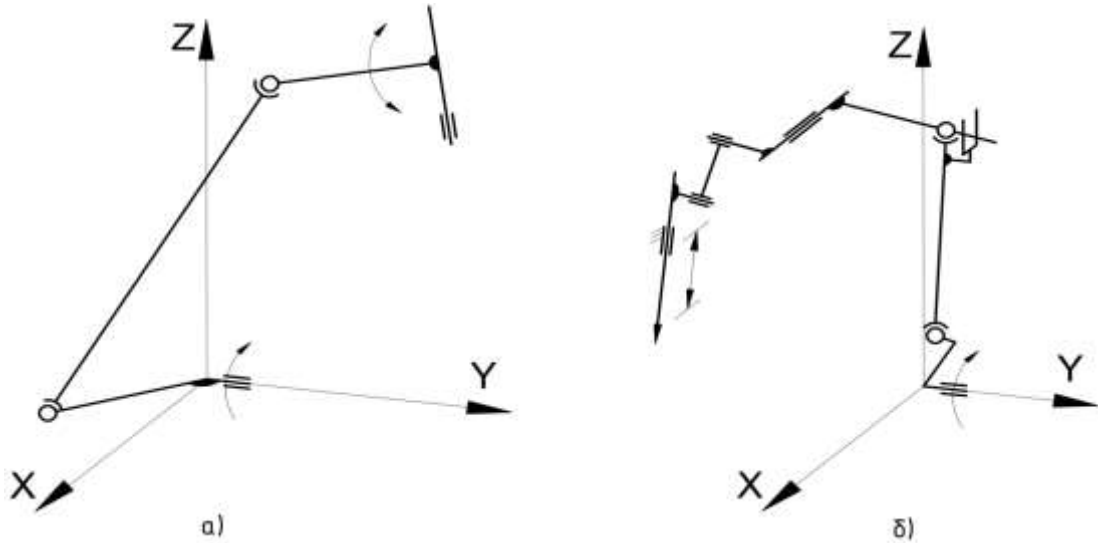


Рисунок 1 – Просторові механізми зі змішаними механічними зв'язками

Ще одним прикладом може служити типовий просторовий шестиланковий механізм голки краєобметувальної швейної машини (рис. 1б), що має 4 обертальних та 1 поступальну кінематичну пару (тобто 5-го класу) та 2 – четвертого класу (сферичні з пальцем):

$$W_2 = 6(6 - 1) - 5 \cdot 5 - 4 \cdot 2 = -3$$

В цих механізмах на кінематичні ланцюги накладені загальні зв'язки: в першому випадку це неможливість руху їх ланок відносно осі Y, а в другому – ще й обертання відносно осі Z. Тому для першого випадку необхідно застосовувати формулу Сомова-Малишева першого сімейства [4], а для другого – формулу другого сімейства:

$$W_1 = 5(n - 1) - 4p_5 - 3p_4 - 2p_3 - p_2 = 5 \cdot 3 - 4 \cdot 2 - 3 \cdot 2 = 1$$

$$W_2 = 4(n - 1) - 3p_5 - 2p_4 - p_3 = 4 \cdot 5 - 3 \cdot 5 - 2 \cdot 2 = 1$$

Тобто механізми працездатні.

Даний підхід застосовується і до просторових механізмів, розроблених авторами [5],



(рис. 2). Механізми складаються з початкового механізму 1-го класу (стійка O_1 – кривошип O_1A) та трьохповодкової просторової групи, що включає шатун AB , який з'єднаний з кривошипом та веденою ланкою BO_2C , що здійснює складний рух (поступальний і коливний), а також повзун D (в механізмі рис. 2а), що з'єднаний з пальцем шатуна AB , або кулісу O_3B , яка охоплює головку шатуна AB , зовнішня сторона якої має плоскі грані (в механізмі рис. 2б).

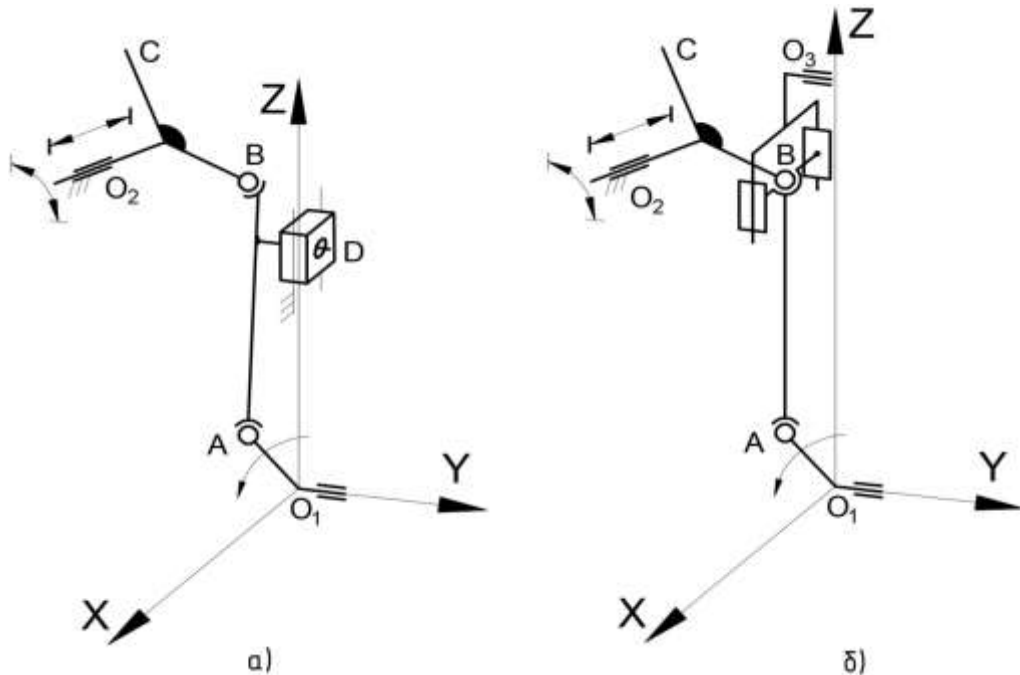


Рисунок 2 – П'ятиланкові просторові механізми

Ці механізми містять по одній кінематичній парі 3-го класу (повзун D – стійка) (рис. 2а), або куліса O_3B – зовнішня головка B шатуна AB (рис. 2б). Відносний рух цих ланок: вздовж осей Y та Z та поворот відносно осі X . Також вони мають по три кінематичні пари 4-го класу (кривошип O_1A – головка A шатуна AB , головка B цього шатуна – ведена ланка BO_2C та ведена ланка BO_2C – стійка). Перші дві пари це так звані «сферичні з пальцем», третя – циліндрична. Нарешті, ці механізми містять дві пари 5-го класу (палець шатуна AB – повзун D (рис. 2а) або вісь куліси O_3B – стійка (рис. 2б) та кривошип O_1A – стійка).

В даних механізмах на ланки накладений загальний зв'язок – неможливість обертання відносно осі Z . Тому ступінь вільності цих механізмів визначається за формулою першого сімейства:

$$W = 5 \cdot 4 - 4 \cdot 2 - 3 \cdot 3 - 2 \cdot 1 = 1$$

Таким чином, обидва запропоновані механізми працездатні.

Висновки. Значна кількість просторових важільних механізмів, що застосовуються в промисловому обладнанні має накладені на її ланки загальні механічні



зв'язки. Тому при структурному їх аналізі потрібно застосовувати сімейства формул, які знаходяться між формулами Сомова-Малишева та Чебишева.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Поліщук, Л.К., (2018). Верстатні комплекси. Проектування роботів та маніпуляторів. Частина I. Вінниця: ВНТУ.
2. Anna University. (2025, 24 лютого). "Mechanical Engineering". <https://www.brainkart.com/menu/mechanical-engineering/>
3. Бучинський, М.Я., & Горик, О.В., & Чернявський, А.М., & Яхін, С.В. (2020). Основи творення машин. Київ: Ліра-К.
4. Стрілець, О.Р. (2023). Теорія механізмів і машин. <https://ep3.nuwm.edu.ua/27728/1/Посібник%20ТММ-11.pdf>
5. Мачульський, В.Б., & Горобець, В.А., & Манойленко, О.П. (2023). Розроблення механізмів петельників швейних машин з П-подібною платформою. Ресурсозберігаючі технології легкої, текстильної і харчової промисловості: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції молодих вчених та студентів (с. 74-75)



Дугієнко Олександр¹, Д'яченко Наталія²

¹магістр математики, Запорізький національний університет, м. Запоріжжя,
Україна, e-mail: aleksandrdugienko@gmail.com

²доцент кафедри фундаментальної та прикладної математики, кандидат фіз.-
мат. наук, доцент, Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна, e-
mail: dyachenkonata69@gmail.com

ЗАДАЧА ЗНОШУВАННЯ ОСНОВИ ВІНКЛЕРІВСЬКОГО ТИПУ ПРЯМОКУТНИМ В ПЛАНІ ШТАМПОМ

Анотація. Розглядається контактна задача зношування півпростору, що моделюється основою типу Вінклера, прямокутним в плані штампом з плоскою та неплоскою підшвами на стадії усталеного зносу у випадку степеневому закону зношування. Досліджено різні методичні підходи в комбінації методів для розв'язання задачі – чисельні та наближено аналітичні. Виявлено вплив вхідних параметрів на зносоконтактні характеристики.

Ключові слова: зносоконтактна задача, закон зношування, прямокутний в плані штамп.

Вступ. Видалення матеріалу з поверхонь контактуючих тіл визначає зношування [1-3]. Такий процес призводить до руйнування механізмів та зменшенню терміну їхньої експлуатації, тому потребує особливої уваги інженерів-дослідників.

Ефективність моделювання півпростору в зносоконтактних задачах основою типу Вінклера перевірена чисельним експериментом через порівняння з результатами, отриманими за допомогою інших моделей, зокрема тієї, що передбачає застосування методу скінченних елементів [2; 3]. Відомо [1], що залежність швидкості зношування від контактного тиску може підпорядковуватися лінійному або степеневому закону зношування. Процес зношування поділяється на дві основні стадії – припрацювання та усталеного зносу; остання характеризується стабілізацією функції контактного тиску та профілю зношеної поверхні [1].

Матеріал і результати досліджень. На стадії усталеного зносу вивчимо зносоконтактну задачу у такій постановці. Розглянемо пружний півпростір, що моделюється основою типу Вінклера, та прямокутний в плані штамп. Площадкою



контакту є область $\Omega = [-a; a] \times [-b; b]$, $a > b$. Під час руху штампа вздовж осі абсцис поверхня півпростору зношується. Дослідження проводиться на стадії усталеного зносу.

Для прямокутного в плані штампа, спираючись на відоме подання функції тиску у вигляді $p(x, y) = p_1(x) / \sqrt{b^2 - y^2}$, $(x, y) \in \Omega$, в роботі [1] сформульовану задачу зведено до плоскої постановки. Основне розв'язувальне рівняння подане як диференціальне або інтегральне; воно доповнюється умовою рівноваги сил [1]. Підшва штампа може бути як плоскою, так і неплоскою. Припустимо, що в обох випадках у кожен момент часу підшва штампа всіма точками торкається півпростору.

У випадку лінійного закону зношування розв'язок задачі наведено в [1]. Особлива увага в роботі приділена степеневому закону, який визначає нелінійне розв'язувальне рівняння. Дослідження нелінійного інтегрального рівняння типу Вольтера другого роду дозволило обґрунтувати існування його єдиного розв'язку. Цей висновок розповсюджується і на диференціальне рівняння, як еквівалентне інтегральному.

Якщо підшва штампа плоска, то задача допускає аналітичне розв'язання, якщо неплоска, то запропоновано як чисельне, так і наближено-аналітичне розв'язання, з метою порівняння результатів. Для чисельного розв'язання диференціального рівняння використано метод скінченних різниць, інтегрального – метод послідовних наближень та метод степеневих рядів. Розв'язки для останніх двох методів подаються поліномами. У кожному випадку розв'язок рівняння залежить від невідомого параметра. Якщо такий розв'язок підставити до умови рівноваги, то вона зведеться до нелінійного алгебраїчного рівняння, до якого застосовано метод половинного ділення.

Якщо в методі скінченних різниць обрати 100 відрізків розбиття проміжку інтегрування рівняння, а в методі степеневих рядів обмежитися многочленами 40-го степеня, то числові значення функцій відрізнятимуться менше, ніж на 1%. Метод послідовних наближень, застосований для фізичного параметра $\kappa = 0.1$, визначає відхилення між результатами для інших методів 0.25%.

За нелінійного закону зношування з показником $\alpha = 1.4$ на рис. 1, а наведено графіки функції тиску під штампом, підшва якого визначена квадратичною функцією $f(\xi) = A\xi^2 + \text{const}$, $\xi = x/a$ для різних значень K . Сірим суцільним лініям відповідає $A = 0$, чорним суцільним – $A = 0.05$, штриховим – $A = 0.25$. На рис. 1, б зображено графіки профілів зношеної поверхні з аналогічним поданням ліній.



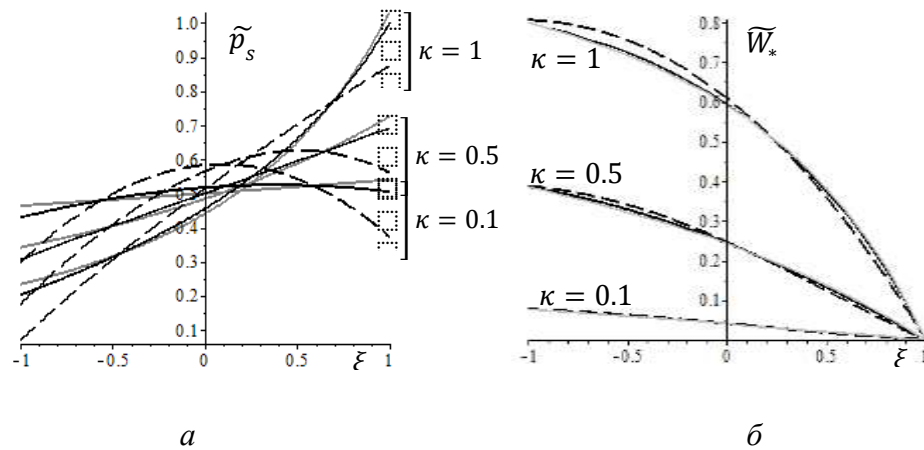


Рисунок 1 – Зносоконтактні характеристики, отримані для різних параметрів A і κ

Оскільки параметр K залежить від пружних характеристик півпростору та коефіцієнта зносу, то за найменшого серед обраних значень $\kappa = 0.1$ вплив параметра A на функцію контактного тиску є найбільш вираженим. Якщо під плоским штампом функція тиску набуває найбільшого значення в точці $\xi = 1$, то під неплоским та точка, якій відповідає найбільше значення функції тиску, може бути внутрішньою на площадці контакту. Збільшення параметра K призводить до збільшення тиску при $\xi = 1$ і зменшенню при $\xi = -1$, при цьому знос збільшується на всій площадці контакту.

Розрахунки показали, що нелінійний (степеневий) закон зношування впливає на урівномірнення функції тиску та зменшення зносу під штампом. Крім того, проведені розрахунки осадки штампа показали, що зі збільшенням параметра K осадка збільшується. До того самого ефекту призводить збільшення параметра A квадратичної функції. У порівнянні з лінійним, степеневий закон призводить до зменшення осадки штампа.

Розрахунки також проведено для штампа, підшова якого визначається тригонометричною функцією. Зазначимо, що для осцилюючої функції наближено аналітичні підходи неефективні. Причина полягає у великих коефіцієнтах розкладу в степеневий ряд осцилюючих функцій. У той же час, чисельні підходи визначають коректні результати для таких функцій підшви.

Висновки. У роботі запропоновано чисельні та наближено аналітичні підходи до розв'язання зносоконтактної задачі для прямокутного в плані штампа з плоскою та неплоскою підшвами. Проведено порівняльний аналіз числових результатів, отриманих різними підходами. Виявлено, що у випадку осцилюючої функції підшви штампа, наближено аналітичний підхід неефективний. Проведено аналіз впливу вхідних параметрів на контактні характеристики. Виявлено урівномірнення функції контактного



тиску за степеневого закону зношування. Отримані результати можуть бути застосовані в інженерних дослідженнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Goryacheva, I. G. (1998) *Contact Mechanics In Tribology* / Part of the book series: Solid Mechanics and Its Applications (SMIA, volume 61): Series Editor: G.M.L. Gladwell. Springer Science & Business Media.
2. Menga, N., & Ciavarella, M. A (2015) Winkler solution for the axisymmetric Hertzian contact problem with wear and finite element method comparison. *J. Strain Analysis*, 50 (3), 156–162.
3. Garcin, S., Baydoun, S., Arnaud, P., & Fouvry, S. (2022) Fretting wear modeling of 3D and 2D Hertzian contacts with a third-body layer using a Winkler elastic foundation model. *Tribology International*, 170, id 107493.



Носов О.В.¹ Ковальов Ю.А.²

¹аспірант, Київський національний університету технологій та дизайну, м. Київ,
Україна, email: 567nav@ukr.net

²старший викладач, к.т.н., доц. Київський національний університету
технологій та дизайну, м.Київ, Україна, e-mail: kovalov.ya@knutd.com.ua

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ

Анотація: Проведена класифікація та аналіз пристроїв для перевантаження об'єктів транспортування. Проаналізовано вплив кожного елемента класифікації на систему транспортування. Описано робототехнічні пристрої, їх конструктивні особливості, недоліки та переваги. Акцентується увага на актуальності розробок роботизації в системі перевантаження та транспортування.

Ключові слова: механізація, автоматизація, робототехнічний пристрій, об'єкт транспортування, перевантаження.

Вступ: Промислове виробництво включає операції транспортування продукції, а саме такі їх складові як завантаження-розвантаження та перевантаження. У зв'язку з цим особливу актуальність набирає рівень технічного оснащення виробництва та його розвиток. Для рішення цих завдань потрібен аналіз існуючих конструкцій механізмів і машин, наукових праць, патентів, винаходів.

Результати дослідження: Основою будь-якого виробництва є технологічний прогрес – це певна взаємодія знарядь та предметів праці, обслуговуючої та транспортної систем, що утворюють складну, багаторівневу виробничу систему [1].

Автоматизація та роботизація виробництва, коли керування та регулювання процесами на виробництві здійснюється без участі людини, є наглядним прикладом технологічного прогресу та невід'ємною частиною виробничих систем в сучасній промисловості.

Ціллю кожного виробництва, виробничої системи є «ощадливе виробництво». Одними з цілей «ощадливого виробництва» є мінімізація втрат. Згідно з Таїті Оно (1912 – 1990 р.р засновник виробничої системи Toyota) одними з головних втрат на виробництві є втрати при непотрібному транспортуванні продукції[15]. Процеси



завантаження-розвантаження та перевантаження об'єктів транспортування є ваговою частиною процесу транспортування.

Враховуючи актуальність теми, аналіз та класифікація сучасних пристроїв по перевантаженню об'єктів виробництва дозволить виявити їх вплив на систему транспортування.

Перевантаження, яке здійснюється шляхом перевантаження з одного транспортного засобу на інший, таке перевантаження називається *безпосереднім*. При безпосередньому перевантаженні можуть бути задіяні приводні та безприводні несучі елементи: стрічкові, роликові, пластинчаті конвеєри.

До пристроїв *що скидають* відносять пристрої зі спеціальним елементом, який регулює процес скидання, впливаючи на ходову частину конвеєра чи на сам об'єкт перевантаження.

Пристрої *що скидають* мають свої переваги серед перевантажувальних пристроїв, а саме: прості в виробництві та використанні, можливість використання в автоматичному режимі. Головним недоліком даного пристрою, враховуючи його конструктивну особливість, є обмеженість варіантів експлуатації в залежності від виду об'єкту перевантаження.

Пристрої *що зіштовхують* мають широке коло використання. Даний тип пристрою передбачає наявність певного органу, що напряму впливає на об'єкт транспортування. Головні плюси та недоліки даного пристрою можна порівняти з *пристроями що скидають*, та коло використання буде залежати від типу об'єкта транспортування.

До *важільних перевантажувальних пристроїв* переважно відносять промислові роботи (ПР). Даний вид пристроїв по конструктивному виконанню поділяють на *плоскі* та *просторові*. Головна перевага *важільних пристроїв* це їх універсальність. В зв'язку зі складністю конструкцій, наявність шарнірів, стріл, приводів та інших елементів збільшує здатність до поломок та більш дорогому обслуговуванню.

Візкові перевантажувальні пристрої це пристрої, до конструктивної особливості яких належить наявність візка та механізму перевантаження. Їх широко використовують в автоматизованих транспортних системах, та komponують різними автоматичними захватами, що дає можливість програмування робочого процесу. З огляду на складність та металоємкість даного виду перевантажувальних пристроїв, в них є свої переваги, що дає можливість покрити всі фінансово-економічні особливості використання, а саме: використання *візкових перевантажувачів* при передачі вантажу на велику відстань, чи



висоту, транспортування вантажу великою масою, великими габаритними розмірами. [2,3,4,5].

Живильники – пристрій виключно для завантаження, що використовується для рівномірної подачі регульованої кількості вихідного матеріалу. Використовується даний вид пристрою при дозуванні матеріалу в виробництві продукції, в збагачувальному устаткуванні.

Накопичувальні пристрої використовуються у складі транспортних систем з метою забезпечення ритмічності роботи виробничих ділянок та окремих агрегатів. До найбільш важливих ознак, які характеризують накопичувальні пристрої, відносяться: функціональне призначення (накопичування, розподіл та перевантаження), місце розташування в лінії, конструкція, особливості вантажів які накопичуються. [2,3,4,5].

З переліку пристроїв перевантаження, відокремлюються пристрої- *захоплювачі* (*захватні пристрої*). *Захоплювачі* – це підсистеми механізмів захвату , які забезпечують тимчасовий контакт з об'єктом , який потрібно захопити та являють собою кінець плеча маніпулятора [17]. Захватні пристрої поділяють на механічні , електромагнітні, вакуумні. Прагнення розширити функціональні можливості захватів призводить до створення захватних пристроїв, максимально наближених до захватного функціоналу людської руки. Для цього кожен палець захвату комплектують керованим приводом, різноманітними датчиками та пристроями для автоматичного зчитування явищ чи антропогенних процесів та автоматичним керуванням ними. Приєднавши до таких можливостей захватного пристрою, можливість керувати процесом за допомогою нейросітки - отримаємо найбільш досконалу модель промислового робота для сучасних реалій чи найближчого майбутнього.

Висновки: Проаналізовано основні переваги та недоліки, особливості використання найбільш вживаних робототехнічних пристроїв. Виходячи з конструктивних особливостей та властивостей , було запропоновано найбільш ефективні варіанти використання пристроїв в системах транспортування . Напрямок ,захватні пристрої з функціоналом людської руки , виділено, як перспективний та той, що потребує подальшої роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. <https://uk.wikipedia.org>
2. Ю. А. Ковальов, В. І. Борисенко, Н. О. Івченко (1987 р.) Механізація транспортних операцій закройно-вирубного виробництва // К.: Легка пром-сть. -№2. – С. 14-16.



3. Ю. А. Ковальов, В. І. Борисенко, Е. Л. Авер'янова (1986 р.) Нова організація виробництва у цеху складання взуття // К.: Легка пром-сть. – №2. – С. 56-57.
4. Ю. А. Ковальов, О. В. Волощенко, В. А. Сліжевський.(1992 р.) Технічне переозброєння міжцехових транспортних операцій // К.: Легка пром-сть. – №1. – С. 20-21.
5. Ю.А. Ковальов, Г.А. Піскорський (1985 р.) Шляхи механізації транспортних і вантажнорозвантажувальних робіт // К.: Легка пром-сть. – №3. – С. 52-54.
6. Я.І. Проць (2008 р.) Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник // ТДТУ ім. І. Пулюя
7. Л.К.Похілько (2013 р.) Питання систематизації та оцінювання фрикційних захватних пристроїв.//Вісник СевНТУ
8. В.І.Онофрійчук, Г.М. Драпак. (2012 р.) Класифікація захватних пристроїв у легкій промисловості. // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки" м. Луцьк Випуск №37
9. І.І. Павелко, В.А. Мажара (2010 р.) Роботизовані технологічні комплекси // КНТУ, м. Кіровоград,
10. Карабегович, І., Турманідзе, Р. і Дашич, П. (2020 р) Робототехніка та автоматизація як основа четвертої промислової революції-індустрія 4.0 //Springer International Publishing
11. Joseph F Engelberger , Associate authors: Dennis Lock and Kenneth Willis (1982) Robotics in practice. Management and applications of industrial robots // New York Newbury House Publishers
12. М.М. Поліщук, М.М. Ткач (2021 р.) Робототехнічні системи : проектування і моделювання //КПІ ім. Ігоря Сікорського
13. Іванченко Ф.К. (1993 р.) Підйомно-транспортні машини, Вища школа
14. Я. І. Проць, В. Савків, О. Фендьо. (2007 р.) Механізми подачі стрічкового матеріалу в листоштампувальному виробництві // Вісник ТДТУ – Том 12.
15. James P. Womack, Daniel T. Jones, Daniel Roos.(1990 р.) The Machine that changed the World: The Story of Lean Production. Harper Collins, // New York , ISBN 978-0-060-97417-6
16. Л.С. Ямпольський, М.М. Поліщук, М.М. Ткач (1992 р.) Елементи робототехнічних пристроїв і модулі ГВС: Підручник // К.Вища шк., . – 431 с
17. Типи роботів, захватів : <https://dorna.ai/blog/types-of-grippers-for-robots/>



А.Г. Полюхович¹, співавтор Ю.А. Ковальов²

¹аспірант, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна,
e-mail: poliukhovych.a@knutd.edu.ua

²старший викладач, к.т.н., доцент, Київський національний університет
технологій та дизайну, Україна, e-mail: kovalov.ya@knutd.com.ua

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ

Анотація. Розглянута доцільність використання робототехнічних пристроїв для механізації та автоматизації транспортно-логістичних систем, складові пристроїв та їх конструкції. Оцінено конструктивні рішення, що покращують маневреність, стійкість і ефективність виконання транспортно-логістичних операцій. Проаналізовано методи координації дій у робототехнічних системах і використання автономних мобільних платформ для автоматизації транспортування вантажів.

Ключові слова: робототехнічний пристрій; транспортні системи; мобільна платформа; автономний транспорт; маніпулятор.

Вступ. Зростання обсягів транспортування об'єктів виробництва, проблеми забезпечення надійності роботи та збереження об'єктів транспортування зумовлюють активне впровадження робототехнічних пристроїв у сферу транспортно-логістичних процесів. Використання автономних мобільних платформ дозволяє підвищити ефективність операцій та знизити вплив людського фактору. Одним із ключових викликів у проектуванні таких систем є створення механічних конструкцій, які забезпечують не лише стабільність і маневреність, але й гнучкість адаптації до змінних умов середовища. Важливим аспектом є не тільки реалізація ефективних кінематичних схем, а й інтеграція інтелектуальних алгоритмів управління, що оптимізують маршрути та мінімізують енергетичні витрати.

Матеріал і результати досліджень. Сучасні робототехнічні пристрої для транспортно-логістичних систем мають різноманітні механічні конфігурації, що включають мобільні платформи, маніпулятори та системи перевантаження (стикування) з одного елемента системи на інший. У цьому матеріалі представлено аналіз деяких сучасних наукових публікацій, присвячених механічним аспектам конструкції таких систем.



Мобільні платформи. Сучасні мобільні платформи роботів для транспортнологістичних систем реалізуються на основі, як правило, колісних шасі диференціального типу, що забезпечує високу прохідність та стабільність. У розробці [1] пропонуються автономні роботи, які оснащені незалежним приводом на кожне колесо, що дозволяє ефективно адаптуватися до складних середовищ. Крім того, інтеграція допоміжних опорних коліс із всеспрямованими роликами дозволяє уникати втрат енергії під час поворотів. Аналогічний підхід використано в дослідженні [2], де застосовано двоколісні роботи, що забезпечують гнучкість і стабільність руху.

Маніпулятори та захватні пристрої. Важливим компонентом робототехнічних систем є маніпулятори, що адаптуються до форми та розмірів переміщуваних об'єктів. У дослідженні [2] описано дворухомий маніпулятор з можливістю регулювання кута нахилу, що дозволяє здійснювати захоплення візків або контейнерів із мінімальними енергетичними затратами. Запропоновано використання матеріалів із високим коефіцієнтом тертя на робочих поверхнях захвату для надійного утримання вантажів. У роботі [3] розглядаються інтелектуальні маніпулятори, оснащені сенсорами та модулями адаптивного зчеплення, що дозволяють швидко змінювати параметри захвату залежно від типу вантажу.

Системи стикування та кооперації. Системи стикування забезпечують можливість кооперації кількох роботів у межах однієї логістичної операції. Використання пасивних шарнірів та самовирівнювальних механізмів дозволяє зменшити крутні моменти під час взаємодії роботів, що покращує стабільність перевезення вантажів у динамічному середовищі. В роботі [5] запропоновано механізми пасивного вирівнювання, які дозволяють кільком роботам автоматично стикуватися для сумісної роботи без втрати точності. Це суттєво покращує ефективність багатороботних систем.

Інтелектуальне керування. Інтелектуальні алгоритми керування відіграють критично важливу роль у забезпеченні точності переміщення. У дослідженнях [5] та [2] проаналізовано ефективність алгоритмів маршрутного планування, які використовують гібридні карти простору для пошуку оптимального шляху пересування. Такий підхід дозволяє мінімізувати витрати енергії та уникати перешкод у складних середовищах.

Висновки. Аналіз сучасних робототехнічних пристроїв для транспортно-логістичних систем показав, що вдосконалення механічної конструкції є ключовим фактором підвищення їхньої ефективності. Оптимізація мобільних платформ, використання адаптивних маніпуляторів і механізмів стикування сприяють зниженню втрат енергії та підвищенню точності виконання операцій. Перспективними напрямками



подальших досліджень є інтеграція роботів у єдині інформаційні системи логістики та вдосконалення механізмів адаптації до змінних умов експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Y. Hirata, Z. Wang, K. Kosuge (2023). Collaborative Trolley Transportation System with Autonomous Nonholonomic Robots. <https://arxiv.org/abs/2303.06624>.
2. Peijia Xie, Bingyi Xia, Anjun Hu, Ziqi Zhao, Lingxiao Meng, Zhirui Sun, Xuheng Gao, Jiankun Wang, Max Q.-H. Meng (2024). Autonomous Multiple-Trolley Collection System with Nonholonomic Robots: Design, Control, and Implementation. <https://arxiv.org/abs/2401.08433>.
3. Iqtiaar Md Siddique, Selim Molla, MD Rakib Hasan, Anamika Ahmed Siddique (2024). Deployment of Advanced and Intelligent Logistics Vehicles with Enhanced Tracking and Security Features. <https://arxiv.org/abs/2402.11829>.
4. В.В. Аулін, С.В. Лисенко, А.В. Гриньків, Д.В. Голуб, А.О. Головатий (2022).
5. Логістика постачання транспортних і виробничих підприємств, фірм, компаній. КНТУ. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12160>.
6. Junjie Gao, Peijia Xie, Xuheng Gao, Zhirui Sun, Jiankun Wang, Max Q.-H. Meng (2023). Indoor Exploration and Simultaneous Trolley Collection Through Task-Oriented Environment Partitioning. <https://arxiv.org/abs/2309.11107>.



Dmytro Kolosov¹, Ivan Belmas², Serhii Onyshchenko³, Kateryna Antonova⁴

¹*Head of the Department of Mechanical and Biomedical Engineering,
Dr. Sci. (Engin.), Prof., Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail:*

kolosov.d.l@nmu.one

²*Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Dr. Sci. (Engin.),
Prof., Dniprovsk State Technical University, Dnipro, Ukraine, e-mail: belmas09@meta.ua*

³*Associate Professor of the Department of Mechanical and Biomedical Engineering,
Cand. Sci. (Engin.), Ass. Prof., Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail:*

onyshchenko.s.v@nmu.one

⁴*Junior Researcher of the Department of Mechanical and Biomedical Engineering,
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: antonovakv@gmail.com*

ALGORITHM FOR EVALUATING STRESS-STRAIN STATE OF RIGID FIBERS IN COMPOSITE STAY ROPE

Abstract. A method for calculating a stress-strain state of a multilayer orthotropic composite rope is developed. The scientific novelty of research is in establishment of a dependency for distribution of internal loading forces in reinforcing rigid fibers on stay rope parameters. Practical value is in that the presented method allows determining the rope stress-strain state during the designing stage of a permanent structure.

Keywords: Stress-Strain State, Composite Stay Rope, Permanent Structure, Multilayer Orthotropic Rope, Rigid Fiber, Reinforcing Elements, Stress, Deformations.

Introduction. The ropes are used for suspension of spans in bridge structures with long spans. This solution is more technological and allows reducing the construction time [1]. In [2], a method of analytical calculation of a cable-stayed structure is suggested. The use of SCAD software is suggested for selection of rational parameters of elements of a cable-stayed bridge in [3]. For implementation of cable-stayed bridges with composite stay ropes, it is necessary to develop a methodology for their calculation. Its use allows solving the urgent problem of designing cable-stayed bridges with composite ropes.

Research material and results. The suggested orthotropic stay rope as a composite structure has a system of reinforcing fibers of the same diameter d regularly placed in two orthogonal planes. The regularity of placing the fibers when determining the character of their interaction allows considering the interaction of only four fibers with conditional numbers



within the selected prism. Let's conditionally cut out from the composite a part of prismatic shape of an arbitrary i, j^{th} fiber together with a matrix of small length. There is a rectangle $a \times b$ at the base of the prism (Fig. 1).

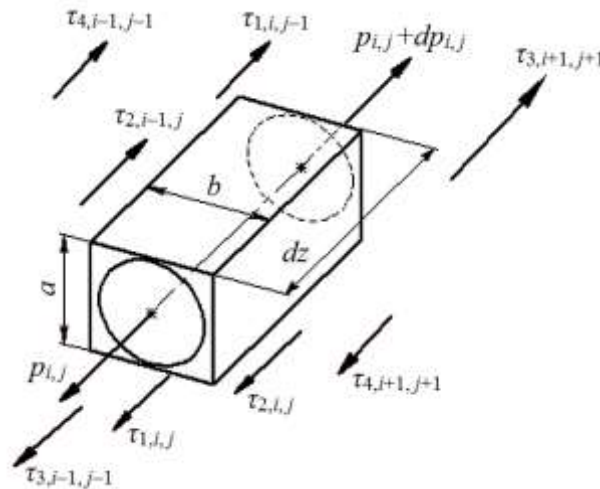


Figure 1 – Part of a composite matrix with a short fiber

Let's direct z-axis parallel to the fibers. Let's formulate the equilibrium condition of a matrix part

$$dP_{i,j} + \left(b(\tau_{1,i,j-1} - \tau_{1,i,j}) + a(\tau_{2,i-1,j} - \tau_{2,i,j}) + \right. \\ \left. + (2\sqrt{a^2 + b^2} - d)(\tau_{3,i-1,j-1} - \tau_{3,i+1,j+1} + \tau_{4,i-1,j+1} - \tau_{4,i+1,j-1}) \right) dz = 0, \quad (1)$$

where $\tau_{\rho,i,j}$ is average tangential stress in shell material between the fibers of one layer $\rho = 1, 2$ with the same numbers in adjacent layers of diagonally located fibers relative to the current i, j^{th} cable with $\rho = 3, 4$.

Due to matrix symmetry, its faces parallel to z-axis, which are flat before deformation remain flat after deformation – mutual displacement of fibers. We consider the fiber cross-section to be flat (unchanged) during the deformation process. Minimum distance between fibers in layers is $a - d$ and between the layers is $b - d$, between the fibers located on lines which are parallel to the diagonals of the prism.

Let's introduce the coefficient k_G of shear rigidity dependency on cross-sectional shape of the matrix. The distance between the fibers is conditionally assumed equal to the minimum. Hooke's law for mutual shear of fibers is

for side cables



$$\begin{aligned}\tau_{1,i,j} &= \frac{Gk_{G_1}}{2b-d}(u_{i,j} - u_{i,j+1}); & \tau_{1,i,j-1} &= -\frac{Gk_{G_1}}{2b-d}(u_{i,j} - u_{i,j-1}); \\ \tau_{2,i,j} &= \frac{Gk_{G_2}}{2a-d}(u_{i,j} - u_{i+1,j}); & \tau_{2,i-1,j} &= -\frac{Gk_{G_2}}{2a-d}(u_{i,j} - u_{i-1,j});\end{aligned}\quad (2)$$

for non-side cables

$$\begin{aligned}\tau_{3,i-1,j-1} &= \frac{Gk_{G_3}}{2\sqrt{a^2+b^2}-d}(u_{i,j} - u_{i-1,j-1}); & \tau_{3,i+1,j+1} &= -\frac{Gk_{G_3}}{2\sqrt{a^2+b^2}-d}(u_{i,j} - u_{i+1,j+1}); \\ \tau_{4,i-1,j+1} &= \frac{Gk_{G_4}}{2\sqrt{a^2+b^2}-d}(u_{i,j} - u_{i-1,j+1}); & \tau_{4,i+1,j-1} &= -\frac{Gk_{G_4}}{2\sqrt{a^2+b^2}-d}(u_{i,j} - u_{i+1,j-1});\end{aligned}\quad (3)$$

where G is shear modulus of a matrix material.

Hooke's law for fiber tension

$$P_{i,j} = E F \frac{du_{i,j}}{dz}, \quad (4)$$

where E , F are reduced modulus of elasticity and cross-section area of an individual fiber.

Consider the expressions of Hooke's law Eq. 2 - 4. Obtain the equilibrium Eq. 1 in an expanded form

$$\frac{d^2 u_{i,j}}{dz^2} + \frac{G}{E F} \left(\begin{aligned} & \frac{k_{G_a} a}{(b-d)} (u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) + \\ & + \frac{k_{G_b} b}{E F (a-d)} (u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}) + \\ & + u_{i-1,j-1} - 4u_{i,j} + u_{i+1,j+1} + u_{i-1,j+1} + u_{i+1,j-1} \end{aligned} \right) = 0, \quad (5)$$

$$1 < i < M \quad \wedge \quad 1 < j < N.$$

The distribution of forces between fibers is



$$p_{i,j} = E F \left(\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left[\left(A_{m,n} e^{\beta_{m,n} z} - B_{m,n} e^{-\beta_{m,n} z} \right) \beta_{m,n} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \cos(\mu_m (i-0.5)) \cos(\chi_n (j-0.5)) \right] + \sum_{m=1}^{M-1} \left(A_{m,m} e^{\beta_{m,m} z} - B_{m,m} e^{-\beta_{m,m} z} \right) \beta_{m,m} z \cos(\mu_m (i-0.5)) + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{N-1} \left(A_{n,n} e^{\beta_{n,n} z} - B_{n,n} e^{-\beta_{n,n} z} \right) \beta_{n,n} z \cos(\chi_n (j-0.5)) \right) + P, \quad (6)$$

where $A_{m,n}$, $B_{m,n}$, $A_{m,m}$, $B_{m,m}$, $A_{n,n}$, $B_{n,n}$ are arrays of constant coefficients; δ is displacement of a tractive element as a rigid body,

$$\beta_{m,n} = \sqrt{\frac{2G}{E F} \left(\frac{k_{G_a} a}{(b-d)} (\cos^2(\mu_m) - 1) + \frac{k_{G_b} b}{(a-d)} (\cos^2(\chi_n) - 1) + 2(\cos(\mu_m) \cos(\chi_n) - 1) \right)},$$

$$\beta_{m,m} = \sqrt{\frac{2G}{E F} (1 - \cos(\mu_m)) \left(\frac{a}{b-d} + 2 \right)}, \quad \beta_{n,n} = \sqrt{\frac{2G}{E F} (1 - \cos(\chi_n)) \left(\frac{b}{a-d} + 2 \right)}.$$

Expressions in Eq. 6, and a possibility of determining tangential stresses in an elastic matrix based on the known values of coefficients, make it possible to determine a stress-strain state of a stay rope taking into account its composite structure. Since the mechanical properties and stay rope design are different and regular in orthogonal directions, the stay rope as a composite structure is orthotropic.

Conclusion. Orthotropic ropes are more suitable for operating conditions of cable-stayed bridges. The considered studies of ropes in permanent structures, in particular cable-stayed bridges, do not allow determining a stress-strain state of a multilayer tractive element (stay rope), taking into account a character of its interaction with the structure.

A model is created, a method for calculating a stress-strain state of an orthotropic composite tractive element is developed, with comprehensive consideration of its design, mechanical properties of its components, and given conditions for connection to the structure. The method allows determining its stress-strain state at a design stage of the permanent structure based on structural parameters and mechanical properties of composite rope components and



conditions of its interaction with the structure, thereby increasing reliability and operational efficiency of the structure, in particular, a cable-stayed bridge.

The ability to provide continuous automatic control of cable breakages allows increasing reliability of a cable-stayed structure by making technical decisions justified for this situation.

It is established that the zone of disturbance of a stress-strain state along the rope length depends on a ratio of shear rigidity of elastic shell material located between the cables and tensile rigidity of cables. The character of disturbance zone distribution across the stay rope cross-section depends on the amount of reinforcing elements and their relative location.

REFERENCES

- [1] Hapchenko S.A. (2013). Calculation of cable-stayed structures by numerical method. *A collection of scientific papers (mechanical engineering, construction) of PoltNTU*, 4(39). Vol.1. 64–70.
- [2] Storozhenko L.I., Yermolenko D.A. (2017). Calculation of a stress-strain state of cable-stayed structures. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 174. 33–42.
- [3] Morhun A.S., Soroka M.M., Met I.M. (2016). Features of calculation of "cable-stayed bridge" structures by means of CAD. *Visnyk of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 4. 7–11.



СЕКЦІЯ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ І СИСТЕМ НОВОЇ ТЕХНІКИ.

А.П. Дзюба¹, А.Г. Пацюк²

¹д. т. н., професор, ДНУ імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна, e-mail:
dzb@ua.fm

²к.т.н., с.н.с., ДНУ імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна, comrtech@ua.fm

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ НАВАНТАЖЕНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ДІЄЮ УДАРУ ВІДОКРЕМЛЕНОЮ МАСОЮ

Анотація. Розроблена методика проведення системних експериментальних досліджень несучої здатності попередньо навантажених моделей циліндричних оболонок під дією локального ударного навантаження сторонньою масою. Створена авторська установка для метання твердих тіл та їх уламків. Подані результати досліджень процесу проникнення поверхні тонкостінних елементів конструкцій.

Ключові слова: ударне навантаження; циліндрична оболонка; пошкодження поверхні; експериментальне дослідження.

Вступ. Експериментальні дослідження процесів руйнування реальних конструкцій під дією удару відокремленою масою є одним із високовартісних етапів розробки елементів сучасної техніки. Створення методики заміни цього етапу менш витратними дослідженнями в лабораторних умовах на моделях є досить важливим при створенні реальних об'єктів машинобудування. Такій підхід дозволяє з мінімальними затратами варіювати параметри досліджуваного процесу та виявити найбільш небезпечні види, величини і напрямки екстремального (руйнуючого) зовнішнього навантаження.

Результати досліджень. В роботі представлено методологію досліджень та лабораторний комплекс, що включає засоби статичного і динамічного навантаження для моделювання процесів руйнування моделей оболонкових конструкцій. Комплекс включає пристрої статичного навантаження конструкції на розтяг-стиск, згинання та кручення, а також засоби ударного навантаження. Розроблено та запатентовано спосіб і



виготовлено пристрій для метання твердих тіл та їх уламків на поверхню досліджуваного об'єкту.

Випробувальний комплекс призначений для вивчення поведінки як навантажених, так і ненавантажених статичними зусиллями оболонкових конструкцій під дією локального ударного навантаження сторонньою масою та (або) уламковими фрагментами. Слід зазначити, що проведення таких експериментальних досліджень з використанням вогнепальної зброї вимагає спеціальних умов її безпечного використання, відповідних дозволів та ін. і, крім того, обмежує можливості змінювати форму, масу, швидкість, енергію вильоту, кількість фрагментів (уламків) та ін.

В основу пристрою для метання твердих тіл покладено електричний принцип підризу алюмінієвої фольги за допомогою системи високовольтних конденсаторів. Алюмінієву фольгу розміщують у герметичній камері з міцного термостійкого електроізоляційного матеріалу. У верхній плоскій частині камери фольгу під'єднують до батареї конденсаторів. В середині нижньої плоскої частини камери є заглиблення еліпсоїдної форми і подовжнім круговим отвором для метання, де і розміщується тіло, або окремі уламки, для метання заданої маси. Швидкість вильоту маси може змінюватись шляхом використання спеціальних вставок для регулювання об'єму камери.

В процесі проведення експерименту на визначену частину поверхні попередньо навантаженої оболонки направляють камеру з тілом для метання. Підривають фольгу в герметичній камері шляхом розряду попередньо заряджених необхідною енергією конденсаторів і далі реєструють результати ударного навантаження на дослідний об'єкт.

Було проведено широкий спектр експериментальних досліджень процесу пошкодження поверхні попередньо навантажених моделей циліндричних оболонок під дією локального ударного навантаження тілом різної маси, форми, кількості уламків, швидкості їх вильоту, площі контакту і кута входження твердого тіла в оболонку та їх вплив на характер деформування і критичну руйнівну силу втрати несучої здатності оболонок.

Зображення характерних пошкоджень оболонок для випадку удару жорстким циліндричним тілом подані на рис.1, рис 2.





Рисунок 1 – Пошкодження бокової поверхні попередньо розтягнутої оболонки після удару жорстким циліндричним тілом з плоским торцем і малою швидкістю (зліва) та конусною передньою частиною (зправа) і високою швидкістю



Рисунок 2 – Характерні картини пошкодження бокової поверхні попередньо стиснутих поздовжньою силою (меншою, ніж критична) оболонок, уражених уламковими фрагментами

Висновки. Розроблений комплекс дозволяє виявити особливості процесу удару в залежності від форми, маси, швидкості та кількості тіл, що метаються, та оцінити несучу здатність (живучість) моделей попередньо навантажених оболонкових конструкцій.

Лисиця М.І.¹, Агальцов Г.М.², Новікова А.В.³, Лисиця Н.М.⁴, Калганков Є.В.⁵

¹ Зав. відділом, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, відділ механіки еластомерних конструкцій гірничих машин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), м. Дніпро, Україна, vita.igtm@gmail.com

² Молодший науковий співробітник, інженер, відділ механіки еластомерних конструкцій гірничих машин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), м. Дніпро, Україна, ag.gena@gmail.com

³ Молодший науковий співробітник, магістр, відділ механіки еластомерних конструкцій гірничих машин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), м. Дніпро, Україна, alina.goncharenko@gmail.com

⁴ Асистент, інженер, кафедра комп'ютерних технологій, факультет прикладної математики, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, м. Дніпро, Україна, lisitsa_natalya1971@ukr.net

⁵ Старший викладач, магістр, кафедра «Надійність та ремонт машин», Дніпровський державний аграрно-економічний університет (ДДАЕУ), м. Дніпро, Україна, kalhankov.ye.v@dsau.dp.ua

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОШАРОВИХ СЕЙСМОЗАХИСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Анотація. Наведені результати експериментальних досліджень по визначенню жорсткісних характеристик багатошарових гумометалевих сейсμοзахисних елементів в залежності від товщини гумового шару. Випробуванням піддавалися циліндричні гумометалеві елементи діаметром 200 мм та товщиною гумового шару 5 мм, 10 мм та 20 мм. Визначено, що залежність сила-осідання для всіх типів віброізоляторів носить явно нелінійний характер.

Ключові слова: гумометалевий елемент, багатошаровий елемент, жорсткість на стиск.

Вступ. Системи віброейсмозахисту призначені для зниження реакції будівельних об'єктів їх захисту від землетрусів, динамічних впливів підземного, автомобільного,



залізничного транспорту та ударних хвиль від вибухів. На теперішній час у світі широко використовуються захисні елементи на основі гумових і гумометалевих конструкцій [1]. Розрахунки жорсткісних параметрів таких конструкцій виконуються з урахуванням зміни об'єму гумового шару [2, 3]. Отримані залежності потребують експериментальної перевірки.

Мета роботи – експериментальне визначення жорсткісних характеристик гумометалевих віброізоляторів в залежності від співвідношення діаметра до товщини гумового шару.

Випробуванням піддавалися циліндричні гумометалеві віброізолятори, у яких гумовий масив є циліндром діаметром D та висотою h_p , до торців якого по всій поверхні привулканізовані металеві циліндричні пластини. Усього було випробувано три типорозміри віброізоляторів (рис. 1). Усі віброізолятори мали діаметр $D = 200$ мм і відрізнялися лише товщиною гумового шару $h_p = 5$ мм, 10 мм, 20 мм. Перед випробуваннями віброізолятори збиралися в стопки. Кількість віброізоляторів при $h_p = 5$ мм складала 10 шт.; при $h_p = 10$ мм – 10 шт.; при $h_p = 20$ мм – 5 шт.



Рисунок 1 – Віброізолятори, що піддавалися лабораторним випробуванням

Всі гумометалеві елементи виготовлялися із середньонаповненої гуми типу 2959. Дослідження проводилися на механічному пресі та гідравлічному типу ПР-250. Перед випробуваннями всі стопки піддавалися тренуванню – триразовому деформуванню з подальшим розвантаженням. Витримка перед зняттям показань сили та осідання була 5 хв на механічному пресі та 3 хв на гідравлічному. Величина навантаження визначалась за допомогою зразкового динамометру, осідання (переміщення) – індикатором годинникового типу. Результати випробувань та розрахунки жорсткісних параметрів зведені у табл. 1, де C_c – жорсткість на стиск стопки елементів, C_1 – жорсткість одного елементу.



Таблиця 1 – Результати випробувань віброізоляторів

	Товщиною гуми $H_g = 20$ мм, $n = 5$ шт., повна висота шару гуми $H = 100$ мм										
P , кН	0,0	14,0	29,9	57,2	110,0	165,0					
Δ , мм	0,00	1,23	2,75	4,94	9,30	12,30					
C_c , МН/м		11,382	10,873	11,579	11,828	13,415					
C_1 , МН/м		56,91	54,365	57,895	59,14	67,075					
	Товщина гуми $H_g = 10$ мм, $n = 10$ шт., повна висота шару гуми $H = 100$ мм										
P , кН	0,0	32,0	59,6	110,0	174,0	225,0	280,0	417,0	564,0	701,5	
Δ , мм	0,00	0,63	1,26	2,70	3,87	5,13	6,12	8,10	9,63	10,80	
C_c , МН/м		50,794	47,302	40,741	44,961	43,860	45,752	51,481	58,567	64,954	
C_1 , МН/м		507,937	473,016	407,407	449,612	438,596	457,516	514,815	585,670	649,537	
	Товщина гуми $H_g = 5$ мм, $n = 10$ шт., повна висота шару гуми $H = 50$ мм										
P , кН	0,0	42,5	111,0	250,0	398,0	536,0	675,0	805,0	925,0	1082,0	1387,5
Δ , мм	0,00	0,27	0,47	0,76	1,04	1,40	1,67	1,84	2,12	2,30	2,50
C_c , МН/м		157,4	236,2	328,9	382,7	382,9	404,2	437,5	436,3	470,4	555,0
C_1 , МН/м		1574,1	2361,7	3289,5	3826,9	3828,6	4041,9	4375,0	4363,2	4704,3	5550,0

На рис. 2 наведено отримані залежності «сила стиску – осідання», а на рис. 3 залежність жорсткості віброізоляторів від співвідношення радіусу до товщини гумового шару для всіх типів віброізоляторів.

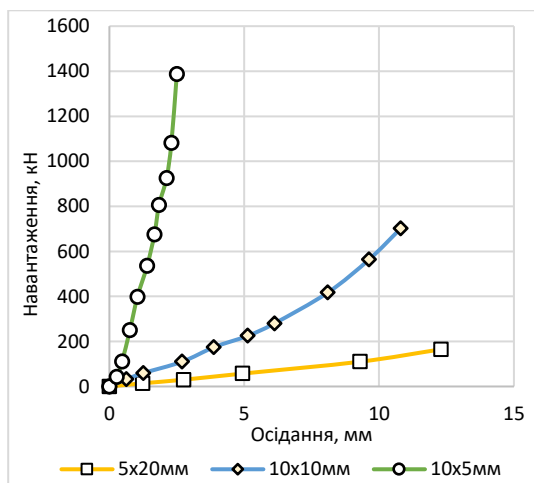


Рисунок 2 – Експериментальні залежності «сила стиску – осідання»

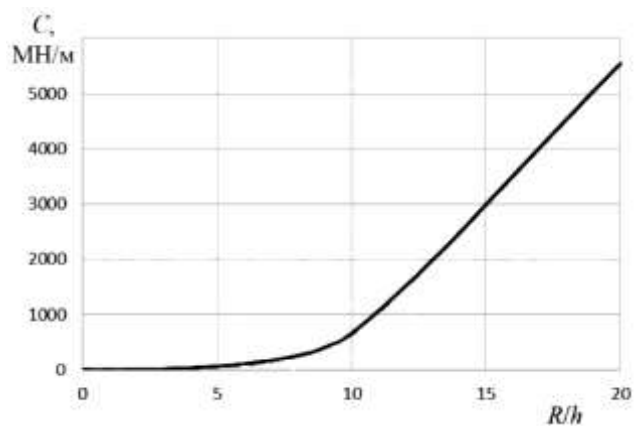


Рисунок 3 – Залежності вертикальної жорсткості від співвідношення розмірів гумового шару віброізолятора

Висновки. Визначено, що залежність «сила-осідання» для всіх типів віброізоляторів носить явно нелінійний характер та ступінь нелінійності збільшується із зменшенням товщини гумового шару. Жорсткість на стиск суттєво залежить від співвідношення розмірів гумового шару віброізолятора і при співвідношенні $R/h > 10$ різко збільшується.



Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні систем вібросейсмосахисту будівель та споруд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Erikawa, T. (2018). Design procedure and examples of seismic isolation buildings in Japan. In *“International Seminar on Technologies of Earthquake-Resistant Construction”*, Almaty, Kazakhstan, September 17-19, 2018. P. 56-61.
2. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Lysytsya, M.I. and Grebenyuk S.M. (2018). Numerical simulation of the stress-strain state of thin-layer rubber-metal vibration absorber elements under nonlinear deformation, *Strength of Materials*, 50 (3), pp 387-395. <https://doi.org/10.1007/s11223-018-9982-9>
3. Bulat, A.F., Kobets, A.S., Dyrda, V.I., Lapin, V.A., Grebenyuk, S.M., Lysytsia, M.I., Marienkov, M.H., Ahaltsov, H.M., Kalhankov, Ye.V. (2021) Vibroseismic protection of buildings and structures against natural and technogeneous dynamic impacts. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. Vol. 1, no. 445, 58-65. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.9>



Ковель Петро¹, Нагорний Леонід², Жикол Павло³

¹ *провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,*

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна, e-mail:

peter.kovel@gmail.com

² *старший науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна, e-mail:*

leonid.maga.61@ukr.net

³ *старший науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна, e-mail:*

zhikakiev@ukr.net

ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСНИХ ПОКАЗНИКІВ ВТУЛКОВО-РОЛИКОВИХ ЛАНЦЮГІВ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ НА ВЕРТОЛЬОТАХ

У статті наведено результати лабораторних досліджень технічного стану втулково-роликів ланцюгів вертольотів Ми-8МТ(МТВ), Ми-24: нового та з наробітком більше встановленого нормативною документацією. Проведено випробування на розрив втулково-роликів ланцюгів, які мали наробіток на вертольотах, визначено залежність видовження ланцюга та зусилля на його розрив.

Проведено аналіз наявної пономерної інформації про наробіток втулково-роликів ланцюгів, які надходять на авіаремонтне підприємство разом з вертольотом для виконання капітального ремонту.

Ключові слова: втулково-роликовий ланцюг, вертольоти Ми-8МТ(МТВ), Ми-24, ресурс, видовження ланцюга, зусилля на розрив ланцюга, технічний стан, міцність, ресурс.

Вступ. Протягом 2022-2025 років значно збільшилося використання вертольотів типу Ми-8МТ(МТВ), Ми-24, що призводить до інтенсивного вичерпання ресурсу вертолітного парку, задіяного до виконання відповідних завдань. Це потребувало, в тому числі, наявності та заміни значної кількості агрегатів та комплектувальних виробів ресурси та строки служби яких відрізняються від ресурсів і строків служби вертольота.



На теперішній час у державній авіації України для підтримання та відновлення справності вертольотів Ми-8МТ(МТВ), Ми-24 існує певна система підтримання льотної придатності вертолітного парку [1, с. 3...13].

З метою можливості збільшення призначених показників втулково-роликів ланцюгів ПР-15,875-2300-1-67 (далі - ланцюги) проведено аналітичні та лабораторні дослідження можливості збільшення призначених показників цим комплектувальним виробам.

Матеріали і результати досліджень. З метою збільшення ресурсу ланцюгам вертольотів Ми-8МТ(МТВ), Ми-24 проведено лабораторні дослідження семи ланцюгів, а також проведено аналіз записів пономерної документації на 278 ланцюгів, які зняті під час виконання капітального ремонту з зазначених типів вертольотів. З них 99 ланцюгів вертольотів Ми-8МТ(МТВ) та 179 ланцюгів вертольотів Ми-24. Основна причина зняття ланцюгів на АРП – це надходження в ремонт основного виробу.

Провівши аналіз наробітку, знятих під час ремонту ланцюгів можна стверджувати, що до 50% ланцюгів вертольотів Ми-24 та до 40% ланцюгів вертольотів Ми-8МТ(МТВ) знімаються за наробітку до 500 годин з початку експлуатації. Частка ланцюгів, які знято з експлуатації з наробітком від 500 до 1000 годин становить 49% вертольотів Ми-24 та 37% вертольотів Ми-8МТ(МТВ). Разом з тим є ланцюги, які мають наробіток більше 1000 годин – це до 9% ланцюгів вертольотів Ми-24 та понад 37% ланцюгів вертольотів Ми-8МТ(МТВ).

Встановлено, що один ланцюг вертольотів Ми-24 та сім ланцюгів вертольотів Ми-8МТ(МТВ) мають наробіток значно більший 1500 годин.

Максимальний наробіток ланцюга на вертольоті Ми-24 становить – 1771 годину, а на вертольоті Ми-8МТВ – 2002 години.

Зазначені результати експлуатації ланцюгів свідчать про значні запаси їх призначеного ресурсу.

Під час проведення лабораторних досліджень ланцюгів перевірено геометричні розміри, зусилля на розрив та інші параметри, що впливають на надійність ланцюгів відповідно до вимог

[2, с.1-11].

Проаналізовано величину видовження ланцюгів в залежності від наробітку та типу вертольота на якому проводилася їх експлуатація. За результатами цього аналізу можна відмітити, що видовження ланцюга залежить, як правило, від його наробітку. При збільшенні наробітку, як правило, зростає і видовження ланцюга. Але мають місце



випадки, коли при значних наробітках видовження ланцюга не значне або взагалі відсутнє. Виявлена і така закономірність, що на вертольотах Ми-24 видовження ланцюгів значно більше при тих же наробітках ланцюгів, що і на вертольотах Ми-8МТ(МТВ). Це можна пояснити значно більшою кількістю переміщень педалей і більшими навантаженнями на ланцюг, від лопатей рульового гвинта.

Також досліджено залежність величини відрізків видовження ланцюгів (49 ланок) [2, с.8] від їх розташування на ланцюгах. Встановлено, що найбільше видовження ланцюгів спостерігається в середній частині. Це пов'язано з тим, що при роботі ланцюга він переміщається на зірочці не по всій довжині, а переважно в середній частині.

Проведено лабораторні випробування зусиль на розрив ланцюгів, які мають наробіток та нового, з метою з'ясування запасу міцності та визначення можливої залежності зусиль на розрив від наробітку. Характер руйнування елементів ланцюга наведено на (рис.1).

В ході випробувань встановлено, що: руйнування ланцюгів відбувається по валикам; залежності величини зусилля на розрив ланцюгів від їх видовження не виявлено; величина зусиль на розрив усіх досліджуваних ланцюгів більше від встановленої Стандартом на 12,8% - 13,7%.

Слід зазначити, що на ланцюгах демонтованих з вертольотів, які перебували в експлуатації за строками значно більше ніж передбачено нормативною документацією виявлено такі дефекти:



Рисунок 1. – Загальний вигляд фрагментів ланцюга після випробування його на розрив.

Раковини на головках валиків від 12 до 22 штук; поверхнева корозія зовнішньої та внутрішньої поверхні пластин. При цьому площа корозії пластин становить від 5% до 23%; наявна корозія на одному з ланцюгів на поверхні 17 роликів; потемніння головок валиків; потемніння поверхні роликів (на деяких ланцюгах до 65-100%).



Усі досліджувані ланцюги мали легку без заїдань рухливість, захисне покриття пластин задовільне, але є ланцюги на яких воно порушено до основного металу. Тому тривалі строки експлуатації ланцюгів можуть впливати на їх призначений ресурс.

Висновки. За результатами досліджень встановлено.

1. Можливо збільшити призначений ресурс втулково-роликовим ланцюгам ПР-15,875-2300-1-67 вертольотів типу Ми-24, Ми-8МТТ(МТВ) понад 1000 годин.
2. Під час роботи ланцюгів на вертольотах виникає видовження ланцюгів його величина, як правило залежить від наробітку ланцюга. Видовження ланцюгів на вертольотах типу Ми-24 більше ніж на вертольотах типу Ми-8МТ(МТВ).
3. Величина зусиль на розрив ланцюгів мало залежить від видовження ланцюга. Руйнування ланцюгів нового і тих, що мали наробіток відбувається по валиках.
4. На ланцюгах, які мали наробіток після їх препарування на елементах ланцюгів тріщин не виявлено.

Напрями подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на визначення впливу наробітку на технічний стан ланцюгів після відпрацювання ними призначеного ресурсу шляхом проведення лабораторних досліджень геометричних характеристик, зусиль на розрив та відсутності тріщин на елементах ланцюгів. Шляхом аналізу записів засобів об'єктивного контролю та типових етапів польоту вертольота більш точно визначити кількість циклів навантаження ланцюгів протягом однієї години польоту. Важливо також дослідити вплив тривалих строків експлуатації на надійність ланцюгів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ (ВІДПОВІДНО ДО АРА)

1. “Порядок продовження (збільшення) встановлених показників виробів авіаційної техніки державної авіації, за якими не здійснюється авторський нагляд”, введений в дію наказом Міністерства оборони України від 16.02.2015 № 68.
2. Міждержавний стандарт. Ланцюги привідні роликові та втулкові. Загальні технічні умови. Мінськ 2003, - 24 с.



Харченко Володимир¹

¹Провідний фахівець, Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: volodymyrmx@gmail.com

АНАЛІЗ СХЕМ ВИПРОБУВАННЯ КОРПУСУ РДТП НА МІЦНІСТЬ ВНУТРІШНІМ ТИСКОМ

Анотація. Розглянуті різні схеми випробування на міцність внутрішнім тиском корпусу ракетного двигуна твердого палива (РДТП), виготовленого з композиційного матеріалу (КМ). Проведений аналіз навантаженості критичних елементів конструкції РДТП для різних схем випробування і порівняння з навантаженістю при штатних умовах експлуатації РДТП у складі ракети космічного призначення (РКН).

Ключові слова: випробування на міцність, ракетний двигун твердого палива, композиційний матеріал, внутрішній тиск, навантаження.

Останнім часом в РКН широко використовуються РДТП, які мають корпус типу «кокон» з КМ. Основними силовими елементами РДТП є корпус типу «кокон», кришка переднього днища, корпус сопла і кріплення кришки та сопла до корпусу РДТП. Силова конструкція корпусу типу «кокон» складається з силової оболонки, що має переднє і заднє днища та циліндричну частину, передній і задній шпангоути для кріплення до корпусу РДТП суміжних відсіків, переднього і заднього фланців в полюсних отворах днищ, призначених для кріплення кришки і сопла. При роботі РДТП у складі РКН (в польоті) на корпус РДТП та інші силові елементи РДТП діє внутрішній тиск в камері згоряння та зовнішні навантаження. Після виготовлення корпусу РДТП з КМ він, як правило, піддається випробуванням на міцність робочим (максимальним експлуатаційним) тиском з метою підтвердження міцності та визначення його деформативності. При цих випробуваннях відбувається своєрідне «пристосування» корпусу по робочих умов експлуатації у складі РКН. Тому важливою і необхідною умовою при випробуваннях на міцність є максимальна імітація натурних умов експлуатації при випробуваннях.

Розглянуті різні схеми випробування корпусу РДТП з КМ, які включають наступні умови (фактори): спосіб розміщення корпусу при випробуваннях (вертикальне, горизонтальне), робоче середовище (рідина, газ), місце закріплення корпусу у випробувальному стенді (за передній чи задній шпангоути корпусу), розташування



заднього днища корпусу (вгору, вниз), розвантаження заднього днища корпусу (наявність чи відсутність розвантажувального пристрою).

Для різних схем випробування на міцність, які враховують поєднання указаних вище різних факторів, одержані аналітичні залежності для визначення навантажень в критичних зонах конструкції: осьових сил на передній і задній шпангоут корпусу РДТП, на кріплення кришки до фланця переднього днища, на кріплення сопла до фланця заднього днища, в екваторах переднього і заднього днищ, контактний тиск на передній і задній фланці зі сторони пластика переднього і заднього днищ корпусу відповідно.

Для розглянутих схем випробування на міцність типового корпусу «кокон» РДТП за одержаними залежностями визначені навантаження на корпус в критичних зонах конструкції. В тих самих критичних зонах типового корпусу «кокон» РДТП визначені навантаження для умов роботи РДТП при польоті у складі РКН [1-4] та проведені розрахунки на міцність за інженерними та розробленими в ДП «КБ «Південне» методиками [5, 6]. Для різних схем випробування на міцність корпусу РДТП визначені коефіцієнти ступеня імітації натурних умов навантаженості в критичних зонах конструкції як відношення випробувальних навантажень до натурних в цих критичних зонах. Проведений порівняльний аналіз різних схем випробувань за коефіцієнтами ступеня імітації натурних умов навантаженості і вибрана найбільш ефективна схема. Для вибраної схеми випробувань проводиться розрахункове моделювання механічного стану конструкції корпусу РДТП для умов випробувань на міцність [7] і визначаються коефіцієнти запасу міцності.

Розроблена методика вибору схеми випробування корпусу РДТП на міцність внутрішнім тиском, яка забезпечує максимальну ступінь імітації натурних умов навантаженості корпусу РДТП в умовах роботи у складі РКН. Вибрана схема випробувань за такою методикою дозволяє одержати достовірні результати випробувань на міцність. Розроблена методика використовується в практиці ДП «КБ «Південне» при експериментальному відпрацюванні і контрольно-технологічних випробуваннях на міцність внутрішнім тиском корпусів РДТП типу «кокон».

1. Лавров, Л. (1993). Конструкції ракетних двигунів на твердому паливі. М: Машинобудування.
2. Лізін, В. & Пяткін, В. (1985). Проектування тонкостінних конструкцій. М: Машинобудування.



3. Харченко, В., & Клименко, Д. (2019). Навантаженість стиків ракети з урахуванням особливостей конструкцій суміжних відсіків. *Прикладні проблеми механіки і математики*, (17), 98–104.
4. Харченко, В. М., & Клименко, Д. В. (2018). Навантаженість стику відсіків ракети при експлуатації. У збірнику наукових праць Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми механіки та математики» (Т. 2, с. 232).
5. Моссаковский, В. (1990). Міцність ракетних конструкцій. М: Вища школа.
6. Харченко, В. (2017). Моделювання та визначення напруженого стану стиків ракетних конструкцій із композиційних матеріалів. *Прикладні проблеми механіки і математики*, (15), 185–190.
7. Харченко, В. М. (2023). Розрахункове моделювання механічного стану стиків ракетних конструкцій із композиційних матеріалів для умов випробувань на міцність. У збірнику наукових праць Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми механіки та математики» (с. 212).



Харченко Володимир¹, Клименко Дмитро²

¹провідний фахівець, Державне підприємство «Конструкторське бюро
«Південне» ім. М. К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: volodymyrmx@gmail.com

²начальник відділу, канд. техн. наук, Державне підприємство
«Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail:
klymenkov@science.yuzhnoye.com.ua

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН АРМАТУРИ ЛЮКА ДНИЩА КОРПУСУ ТИПУ «КОКОН» З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація. Розглянута методика визначення методом скінченних елементів за допомогою системи інженерного аналізу ANSYS параметрів напружено-деформованого стану арматури люка днища корпусу типу «кокон» з композиційних матеріалів з урахуванням зтяжки кріплення.

Ключові слова: міцність, напружено-деформований стан, корпус типу «кокон», композиційний матеріал, внутрішній тиск.

В народному господарстві і ракетно-космічній галузі використовуються балони високого тиску, ємності для зберігання агресивних середовищ під тиском, корпуси ракетних двигунів, які виготовляються з композиційних матеріалів методом намотування типу «кокон». Днища корпусів таких конструкцій в полюсних отворах мають фланці, призначені для кріплення до них кришок люка за допомогою шпилькового з'єднання.

Дослідження механічного стану арматури люка днища корпусу при дії внутрішнього тиску в корпусі проводилось методом скінченних елементів за допомогою системи інженерного аналізу ANSYS. Визначення напружено-деформованого стану (НДС) арматури люка днища при дії внутрішнього тиску в корпусі проведено за два етапи.

На першому етапі конструкція днища корпусу розглядалась як шарувата оболонка з КМ зі змінними вздовж твірної товщинами шарів і кутами армування [], при цьому фланець з кришкою приймалися як жорстко скріплені і враховувалась контактна взаємодія фланця з днищем. Днище жорстко закріплювалось в зоні екватора днища і навантажувалось внутрішнім тиском. За результатами розв'язку нелінійної задачі визначався розподіл контактного тиску між фланцем і днищем [1, 2].

На другому етапі розглядалась конструкція у складі: фланець корпусу, кришка і кріплення кришки до фланця корпусу (шпильки і гайки). Враховуючи симетрію



конструкції і навантажень розглядалась її $1/(2 \cdot n)$ частина, де n – кількість шпильок (рис. 1). Метрична різьба у фланці і шпильки моделювались як осесиметрична. При побудові скінченно-елементної моделі використовувались скінченні елементи типу SOLID185 (3-D 8-NODE STRUCTURAL SOLID). В зоні різьби застосовувалось ущільнення скінченно-елементної сітки. Контактна взаємодія між деталями (кришка – фланець, шпилька – фланець, гайка – кришка) моделювалась за допомогою контактних елементів типу TARGE170 (3-D TARGET SEGMENT) і CONTA174 (3D 8-NODE SURF-SURF CONTACT). Гайка з шпилькою вважалась жорстко з'єднаними. Моделі матеріалів деталей приймалися як пружно-пластичні (мультілінійні з кінематичним зміцненням).

Моделювання затягування кріплення проводилось за такою методикою. За аналітичними залежностями [3, 4] з урахуванням податливостей деталей визначались взаємні деформації (переміщення) шпильки і з'єднаних деталей в залежності від сили затягування шпильки. Гайка зміщувалась вздовж шпильки в сторону фланця (проникнення гайки в тіло кришки) на величину взаємного переміщення шпильки і з'єднаних деталей. Далі проводився розрахунок контактної задачі за допомогою ANSYS і визначались осьові нормальні напруження в шпильці. Величина проникнення коригувалась, щоб одержати необхідне значення напруження (сили) затяжки шпильки, і проводився повторний розрахунок та визначались параметри НДС при затяжці стику і запаси міцності конструкції.

Далі на внутрішню поверхню кришки і фланцю прикладався внутрішній тиск та контактний тиск на фланець, значення якого було визначено за результатами розрахунків на першому етапі (рис. 1). Проводився розрахунок на міцність конструкції арматури люка переднього днища корпусу типу «кокон» з композиційних матеріалів з урахуванням затяжки кріплення та визначались параметри НДС: переміщення, деформації і напруження (рис. 2) в кришці, фланці, шпильці і гайці та контактні напруження між деталями і в витках різьби шпильки і фланцю. За результатами розрахунку визначались запаси міцності конструкції.



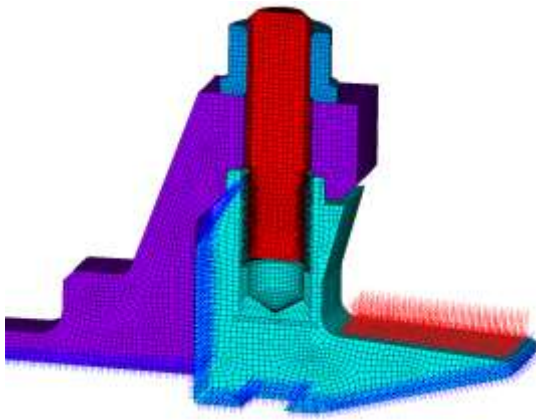


Рис. 1

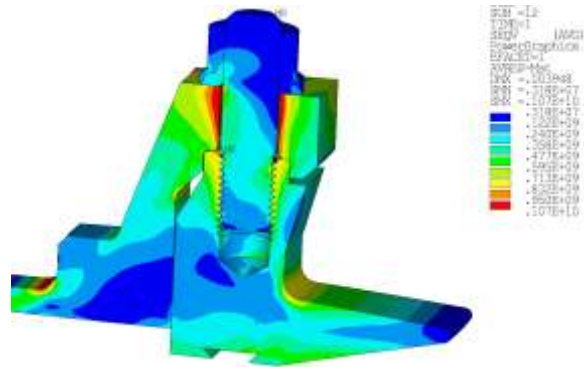


Рис. 2

Розроблена методика визначення напружено-деформованого стану арматури люка днища корпусу типу «кокон» з композиційних матеріалів при дії внутрішнього тиску з урахуванням попередньої затяжки кріплення кришки до фланцю. Проведений аналіз параметрів НДС конструкції та зроблений висновок щодо міцності конструкції. Розроблена методика використовується в практиці ДП «КБ «Південне» проєктних і повірочних розрахунках на міцність корпусів з КМ типу «кокон».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Санін, Ф., & Потапов, А., Коваленко, В., Кондратьєв, А., Атаманчук, Р., Клименко, Д., Харченко, В. (2016). Дослідження напружено-деформованого стану композитного корпусу типового ракетного двигуна твердого палива з металевими закладними елементами в полюсних областях. Питання проєктування та виробництва конструкцій літальних апаратів, (85), 36-46.
2. Моссаковський, В. (1990). Міцність ракетних конструкцій.
3. Біргер, І. & Іосилевич, Г. (1990). Різьбові та фланцеві з'єднання.
4. Біргер, І., Шорр, Б., & Йосилевич, Г. (1993). Розрахунок на міцність деталей машин.



А.Ю. Глухов

старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук,

Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАНУ, Київ, Україна,

ndrew.gl@gmail.com

ПРО ВЗАЄМОДІЮ ШАРІВ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ КРУЧЕННІ

Анотація. В рамках лінеаризованої теорії пружності для тіл з початковими напруженнями розглянуті постановка та метод розв'язку задач про поширення хвиль кручення в шаруватих композитних заздалегідь напружених матеріалах при проковзуванні шарів. Досліджено випадок поширення хвиль вздовж шарів. Отримані дисперсійні рівняння для симетричних і антисиметричних хвиль та їх довгохвильові наближення.

Ключові слова: шаруватий композитний матеріал, початкові напруження, пружні хвилі, дисперсійне рівняння, довгохвильове наближення.

Вступ. В даній роботі досліджуються закономірності поширення пружних хвиль кручення в шаруватих композитних матеріалах з початковими напруженнями при проковзуванні шарів.

Матеріал і результати досліджень. Розглядається шаруватий композитний матеріал з початковими напруженнями, який складається з шарів двох типів, що чергуються, в кожному з яких матеріали і початкові напружено-деформовані стани є однаковими для розглянутого типу шарів.

При дослідженні будемо застосовувати лагранжеві координати $y_n \equiv y^n$, які в початковому напружено-деформованому стані збігаються з декартовими координатами, і лагранжеві координати r', θ, y_3 , які в початковому напружено-деформованому стані збігаються з круговими циліндричними координатами.

Декартову систему координат (y_1, y_2, y_3) в початковому напружено-деформованому стані вибираємо таким чином, щоб вісь була спрямована по нормалі до площин розділу шарів.

Матеріали шарів вважатимемо гіперпружними ізотропними з довільною структурою пружних потенціалів; у разі трансверсально-ізотропних гіперпружних матеріалів шарів будемо вважати, що вісь ізотропії спрямована уздовж осі Oy_3 .



Під хвилями кручення будемо розуміти нормальні хвилі, що поширюються в радіальному напрямку і відповідають крутильним коливанням нескінченного шару.

Вважаємо початковий напружений стан однорідним

$$u_m^0 = (\lambda_m - 1)x_m; \quad \lambda_m = \text{const}. \quad (1)$$

Також приймаємо, що для кожного з шарів реалізується вісесиметричний напружено-деформований стан

$$\begin{aligned} S_{11}^{0(j)} = S_{22}^{0(j)} \neq S_{33}^{0(j)}; \quad \sigma_{11}^{0(j)} = \sigma_{22}^{0(j)} \neq \sigma_{33}^{0(j)}; \\ \varepsilon_{11}^{0(j)} = \varepsilon_{22}^{0(j)}; \quad \lambda_1^{(j)} = \lambda_2^{(j)}; \quad h'^{(j)} = \lambda_3^{(j)} h^{(j)}; \quad j = 1, 2. \end{aligned} \quad (2)$$

При вище вказаних умовах будемо досліджувати переміщення, що відповідають умовам [1,2]

$$u_{r'}^{(j)} \equiv 0; \quad u_{\theta}^{(j)} = u_{\theta}^{(j)}(r', y_3, \tau); \quad u_3^{(j)} \equiv 0; \quad u_4^{(j)} \equiv p^{(j)} \equiv 0. \quad (3)$$

Остання тотожність в (3) справедлива для нестисливого матеріалу.

У цьому випадку в поданні спільних розв'язків просторових динамічних лінеаризованих задач теорії пружності стосовно до загального розв'язке задачі в циліндричних координатах можна прийняти

$$\Psi^{(j)} = \Psi^{(j)}(r', y_3, \tau); \quad X'^{(j)} \equiv 0. \quad (4)$$

Розглянуто поширення хвиль кручення в радіальному напрямку вздовж шарів. Задача зводиться до побудови розв'язків рівняння відносно амплітудної функції при виконанні умов неперервності в площинах розділу шарів і умов періодичності, відповідно теорії Флоке. Для симетричних і антисиметричних хвиль кручення отримані дисперсійні рівняння та їх довгохвильові наближення.

Висновки. Між шарами композитного матеріалу у випадку проковзування не відбувається взаємодії. Швидкості розповсюдження хвиль кручення в кожному із шарів залежать від механічних параметрів матеріалу шару, товщини шару та початкових напружень. При довгохвильовому наближенні швидкості поширення симетричних і антисиметричних хвиль кручення для кожного з шарів рівні швидкостям поширення поперечних хвиль в однорідному матеріалі з початковими напруженнями відповідно першого і другого шарів.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гузь, О. (2016) Пружні хвилі в тілах з початковими (залишковими) напруженнями: у 2-х частинах. Ч. 1. Загальні питання. Хвилі в нескінченних тілах і поверхневі хвилі. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing.
2. Гузь, О. (2016) Пружні хвилі в тілах з початковими (залишковими) напруженнями: у 2-х частинах. Ч. 2. Хвилі в частково обмежених тілах. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing.



Романишин Ігор¹, Мокрий Олег²

¹старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Львів,

Україна, igor.romanyshyn1957@gmail.com

²провідний науковий співробітник, доктор технічних наук, доцент, Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Львів, Україна,

mokomo2323@gmail.com.

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ БАГАТОЧАСТОТНОГО ЗОНДУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИМИ АКУСТИЧНИМИ ХВИЛЯМИ. ОГЛЯД

Анотація. Розглянуті закономірності впливу на дисперсійну залежність фазової швидкості хвиль Релея різних видів обробок, деградації поверхні, плівкового покриття матеріалу тощо та методи визначення властивостей приповерхневих шарів на основі дисперсійної кривої.

Ключові слова: поверхневі акустичні хвилі, дисперсійна крива, метод зваженого усереднення.

Експериментальне визначення властивостей приповерхневих шарів матеріалу є актуальною задачею фундаментального матеріалознавства і технічної діагностики матеріалів. Адекватним підходом для цього є застосування поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) різної частоти [1,2]. Це зв'язано з тим, що поверхневі акустичні хвилі проникають на глибину порядку довжини хвилі. Тому хвилі різної частоти охоплюють різні товщини приповерхневих шарів. При цьому виникає задача інверсії дисперсійної кривої фазової швидкості ПАХ (Surface Wave Inversion) [3], тобто визначення акустичних властивостей приповерхневих шарів на основі багаточастотного зондування матеріалу ПАХ. Аналогічні задачі виникають в геотехніці [4,5], сейсмології [1,6].

Розроблено ряд методів визначення властивостей матеріалу по глибині на основі зондування ПАХ [1-6]. Серед них – одномодові та багатомодові, трансмісійні на основі використання дисперсійних співвідношень, аналізу еліптичності, рефлексивні, променеві та ін. Всі ці методи, як правило, потребують розв'язку прямої задачі поширення пружних хвиль в плоскошаруватому середовищі. Для розв'язку цієї задачі застосовують чисельне інтегрування, променевий та матричний підходи. Ці методи є



складними, трудоемкими, обмеженими ідеально плоскошаруватими структурами з геометричної точки зору, простими моделями середовища і поширення акустики з фізичної точки зору, не забезпечують отримання розв'язку в реальному часі і часто приводять до неоднозначного результату. Для отримання результату строгими методами змушені користуватися простими моделями, що не дозволяє застосовувати ці результати в реальних умовах. Для подолання цих труднощів користуються апріорною інформацією, евристичними підходами.

Найбільш інформативним є підхід на основі вимірювання швидкості ПАХ на різних частотах, що відповідає різним глибинам проникнення і поширення ПАХ, тобто отримання дисперсійної кривої – залежності фазової швидкості ПАХ від частоти.

В результаті зондування середовища поверхневими акустичними хвилями різної частоти і вимірювання фазової швидкості отримують експериментальну дисперсійну криву – значення фазової швидкості на різних частотах.

Неглибокі шари формують високочастотну область дисперсійної кривої, глибокі – низькочастотну.

Задача експериментального визначення структури та властивостей приповерхневих шарів на основі використання дисперсійної кривої фазової швидкості ПАХ є оберненою і зводиться до варіаційної задачі підбору параметрів середовища до тих пір, поки теоретично розрахована дисперсійна крива не буде відповідати експериментальній.

Розглянуто основні системи та технології експериментального визначення параметрів приповерхневих шарів на основі використання дисперсійної кривої фазової швидкості ПАХ. Серед них:

- лабораторна лазерно-ультразвукова система LAwave [7,8], де збудження ПАХ здійснюється імпульсним лазером, а реєстрація - широкосмуговим п'єзоперетворювачем;
- лабораторна лазерно-інтерферометрична система вимірювання швидкості ПАХ, де збудження здійснюється п'єзоелектричними перетворювачами [9].

Система LAwave [7,8] знайшла широке застосування для неруйнівного контролю товщини плівок від кількох нанометрів до кількох сотень мікрометрів; твердості та товщини поверхневого зміцнення сталі від 0,8 до 1,5 мм; оцінки деградованого шару.

Розроблена високоточна лазерно-інтерферометрична система вимірювання фазової швидкості ПАХ, збуджених п'єзоперетворювачами в широкому діапазоні частот



від 1,5 МГц до 15 МГц, для неруйнівного оцінювання параметрів оброблених поверхонь методом дробоструменевої обробки, ударної обробки лазером, полірованих та ін. [9].

Розроблено ряд евристичних підходів для визначення параметрів приповерхневих шарів на основі дисперсійної залежності фазової швидкості Релея [10-12]. Серед них найбільш поширеним є метод зваженого усереднення на довжині зондуючої акустичної хвилі.

Аналіз чутливості дисперсійної кривої ПАХ до густини, швидкостей поздовжньої і поперечної хвилі, товщини шарів показав, що швидкість поперечної хвилі і товщина домінуюче впливають на фазову швидкість релеївської хвилі. Тому товщина шару і швидкість поперечної хвилі в першу чергу коригуються для мінімізації невідповідності між теоретичними та експериментальними дисперсійними кривими. Варіації інших параметрів призводять до невеликої похибки дисперсійних кривих [11, 12].

Для методу зваженого усереднення [11, 12]: фазова швидкість хвилі Релея на певній довжині хвилі $V_R(\lambda)$ на дисперсійній кривій для багат шарового середовища залежить від швидкостей поперечних хвиль шарів у межах глибини довжини хвилі, а внесок фазових швидкостей хвилі Релея кожного окремого шару V_i зважується ваговим коефіцієнтом W_i , який залежить від товщини шару H_i для N шарів в межах однієї довжини хвилі.

Таким чином, фазова швидкість Релея на довжині хвилі є лінійною комбінацією швидкостей в шарах в межах довжини хвилі:

$$V(\lambda) = \sum_{i=1}^N W_i V_i \quad 0 \leq W_i \leq 1 \quad \sum_{i=1}^N W_i = 1$$

Вагові коефіцієнти розраховуються за формулою:

$$W_i = \frac{\int_{z_{i-1}}^{z_i} f\left(\frac{z}{\lambda}\right) dz}{\int_0^L f\left(\frac{z}{\lambda}\right) dz} \quad f\left(\frac{z}{\lambda}\right) = 1 - \left(\frac{z}{\lambda}\right)^{3/2} - \text{ядро зважування.}$$

Цей вираз подібний до зміщення вертикальної складової хвилі Релея.

Отримано аналітичний вираз для дисперсійної кривої у випадку спрощеного варіанту методу зваженого усереднення, який свідчить, що дисперсійна крива фазової швидкості хвилі Релея для одношарового покриття обробленої поверхні є прямою лінією, що добре узгоджується з відомими розглянутими закономірностями впливу різних видів обробки, деградації поверхні та покриття на дисперсію фазової швидкості Релея. По знаку нахилу дисперсійної кривої (плюс/мінус) можна судити про жорсткість



покриття по відношенню до жорсткості підложки. По величині кутового нахилу дисперсійної кривої можна оцінювати товщину обробленої поверхні.

Висновки. Розглянуті закономірності впливу на дисперсійну залежність фазової швидкості ПАХ різних видів обробок, деградації поверхні, плівкового покриття. Дисперсійна залежність фазової швидкості хвиль Релея є однією з найбільш інформативних для визначення властивостей приповерхневих шарів.

Розглянуті методи визначення властивостей приповерхневих шарів на основі дисперсійної кривої фазової швидкості хвилі Релея. Одним з найефективніших методів визначення властивостей приповерхневих шарів в режимі реального часу є метод зваженого усереднення фазової швидкості хвилі Релея по товщині, що дорівнює довжині хвилі, з врахуванням шарів в межах довжини хвилі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aki K., Richards P.G. Quantitative Seismology. 2nd Edition. – CA: Univ. Sci. Books, Sausalito, 2002. – 700 p.
2. Hess P. Surface Acoustic Waves in Materials Science // Physics Today. – 2002. – **55**, 3. – P. 42-47.
3. Maupin V. Surface Wave Inversion // Encyclopedia of Earthquake Engineering. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. – 16p.
4. Socco L., Foti S., Boiero D. Surface-wave analysis for building near-surface velocity models — Established approaches and new perspectives // Geophysics. – 2010, **75**. – 5. – P.75A83-75A102.
5. Ahn E. Surface-Wave Based Technique for the Evaluation of Self-Healing Performance in Concrete. – M.Sc. Thesis / Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology. – 2017. – 79 p.
6. Foti S., Parolai S., Albarello D., Picozzi M. Application of Surface-Wave Methods for Seismic Site Characterization // Surveys in Geophysics. – 2011. – **32**, 6. – P. 777-825.
7. Schneider D. LAwave® – A Nondestructive Device for Testing Thin Films, Coatings and Material Surfaces by Laser Induced Surface Acoustic Waves / Technical Report. – Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS. – 2013, January. – 9 p. DOI: 10.13140/2.1.4564.7047.
8. Schneider D. Laser Induced Surface Acoustic Waves for Material Testing. Chapter 6. In book: Ida N., Meyendorf N. (eds) Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation. – 2019. July. – P. 171-234. DOI: [10.1007/978-3-319-26553-7_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26553-7_38).



9. Ruiz A. M., Nagy P. B. SAW dispersion measurements for ultrasonic characterization of surfacetreated metals // Instrumentation Measure Metrologie. – 2003. – X. – X. – 26 p.
10. Satoh T., Poran C.I., Yamagata K., Rondriquez J.A. Soil profiling by spectral analysis of surface waves. In: Proceedings of the second international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics, vol. II. - 1991. - P.1429–1434.
11. Leong E.C., Aung A.M.W. Weighted Average Velocity Forward Modelling of Rayleigh Surface Waves // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2012, 43. – P.218–228.
12. Leong E.C., Aung A.M.W. Global Inversion of Surface Wave Dispersion Curves Based on Improved Weighted Average Velocity Method // J. Geotech. Geoenviron. Eng. – 2013, 139, December. – P. 2156-2169.



Олег Герасимчук¹, Олег Кононученко²,

¹керівник відділу, д. т. н., с. н. с., Інститут проблем міцності імені Г.С.

Писаренка НАН України, Київ, Україна, e-mail: o.gerasimus@gmail.com

²с. н. с., к. т. н., старш. докл., Інститут проблем міцності імені Г.С.

Писаренка НАН України, Київ, Україна, e-mail: koleg70@gmail.com

ПРОГНОЗУВАННЯ КІНЕТИКИ ЗРОСТАННЯ КОРОТКОЇ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ У МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛАХ ЗА ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗІ ЗМІННИМ РОЗМАХОМ НАПРУЖЕНЬ

Анотація. Запропоновано модель для оцінки кількості циклів навантаження від моменту ініціювання втомної тріщини до досягнення нею певного критичного розміру у зразках із концентратором напружень за ступінчастого режиму зміни прикладеного розмаху одновісних напружень циклу. Вихідними даними є характеристики пружності (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та напруження початку макротекучості) та характеристики мікроструктури (розмір зерна, фактор Тейлора, вектор Бюргерса та кут розорієнтування між зернами, які визначаються з аналізу вихідного матеріалу.

Ключові слова: ступінчасте циклічне навантаження, коротка втомна тріщина, сталь 45.

Вступ. Розуміння механізмів втомного руйнування має важливе значення для оцінки ресурсу елементів конструкцій, що працюють в умовах змінних навантажень. Загальноприйнято розділяти процес втомного руйнування на дві стадії: зародження втомної тріщини (стадія 1) і її ріст до руйнування (стадія 2). Презентована праця присвячена розробці моделі для розрахунку кількості циклів під час росту короткої втомної тріщини (тривалості стадії 2) з моменту її ініціювання з лінійним розміром l_0 до кінцевого розміру l_{lc} , який приймається за критерій руйнування від втоми, за змінного (ступінчастого) циклічного навантаження. Вона є продовженням [1], в якій розроблено модель для розрахунку тривалості стадії 1 за аналогічних режимів навантаження. Модель розробляється на базі моделі швидкості росту втомної тріщини від вільної поверхні матеріалу за постійного прикладеного розмаху напружень циклу [2].

Опис моделі. Оскільки на стадії 2 тріщина спочатку коротка, в [2] було запропоновано модель швидкості росту короткої втомної тріщини з моменту її



ініціювання від гладкої поверхні зразка або від концентратора напружень за фіксованого прикладеного розмаху напружень циклу. Рівняння швидкості росту має вигляд :

$$\frac{dl}{dN} = \frac{v_0}{(\Delta K_{th,in})^{m_{in}}} [(\Delta K_e)^{m_{in}} - (\Delta K_{th,in})^{m_{in}}], \quad (1)$$

де v_0 – мінімальна швидкість росту тріщини, яка дорівнює одній міжатомній відстані b у напрямку вектора Бюргерса b за цикл; ΔK_e – ефективна рушійна сила втомної тріщини

$$\Delta K_e = \Delta K - (\Delta K_{th,R} - \Delta K_{th,in})(2 - e^{-k_1(\Delta\sigma,l)} - e^{-k_2(\Delta\sigma,l)}); \quad (2)$$

де ΔK – прикладений розмах КІН; $\Delta K_{th,R}$ – пороговий розмах КІН для довгих тріщин за асиметрії R ; $\Delta K_{th,in}$ – «внутрішній» пороговий розмах КІН [3]; $k_1(\Delta\sigma, l)$, $k_2(\Delta\sigma, l)$ – параметри, які враховують зростання ефекту закриття тріщини за різними механізмами в процесі росту короткої тріщини і які залежать від рівня прикладеного розмаху напружень циклу $\Delta\sigma$ та лінійного розміру тріщини l . Розрахунок $\Delta K_{th,R}$, $k_1(\Delta\sigma, l)$, $k_2(\Delta\sigma, l)$ та m_{in} детально описано у [2].

Кількість циклів навантаження під час росту втомної тріщини до руйнування (тривалість стадії 2) N_{FCG} отримаємо в результаті чисельного інтегрування рівняння швидкості її росту (1) від $l=0$ до $l=l_1$, де l_1 – кінцевий лінійний розмір тріщини, який приймається за критерій руйнування від втоми:

$$N_{FCG} = \frac{(\Delta K_{th,in})^{m_{in}}}{v_0} \int_0^{l_1} [(\Delta K_e)^{m_{in}} - (\Delta K_{th,in})^{m_{in}}]^{-1} dl. \quad (3)$$

За ступінчастого циклічного навантаження алгоритм підрахунку накопичення втомного пошкодження на стадії 2 (тобто зростання лінійного розміру втомної тріщини l) аналогічний такому на стадії 1 [1]. Для стадії 2 нелінійність підсумовування пошкодження від впливу послідовності рівнів навантаження пропонується враховувати, використовуючи вплив лінійного розміру пластичної зони попереду вістря тріщини, яка утворилась за більшого розмаху напружень H , на рівень закриття тріщини під час навантаження за меншого розмаху L .

Тобто після переходу від більшого i -го розмаху напружень H до меншого $(i+1)$ -го розмаху L тріщина розміром c^H_i буде проростати через пластичну зону розміром p^H_r , сформовану $H^{K_{max}}$ попереду вістря за більшого розмаху напружень. Кількість циклів $\Delta n_L(H)$ на цій ділянці розраховується за рівнянням (3), враховуючи (2), де $\Delta K = \Delta K_L$, а



параметри закриття тріщини записуються як $k_1 (\Delta\sigma_H l)$, $k_2 (\Delta\sigma_H l)$. Якщо у спектрі навантажень присутні ступені з розмахом, меншим за границю витривалості $\Delta\sigma_R$, то, на відміну від стадії 1, де припускається, що у цьому випадку пошкодження немає, втомне пошкодження на стадії 2 на таких ступенях зростатиме, починаючи від певного розміру тріщини, відповідно до граничної кривої порогових розмахів напружень.

На рис. 1 наведено розрахункові кінетичні криві росту втомної тріщини в координатах «довжина тріщини від краю отвору на поверхні зразка l – кількість циклів навантаження N » у порівнянні з експериментальними результатами вимірювань розміру тріщини в процесі двоступінчастого циклічного навантаження зразків зі сталі 45 за різних режимів та асиметрій циклу. Отримано хороший збіг кривих з експериментальними даними.

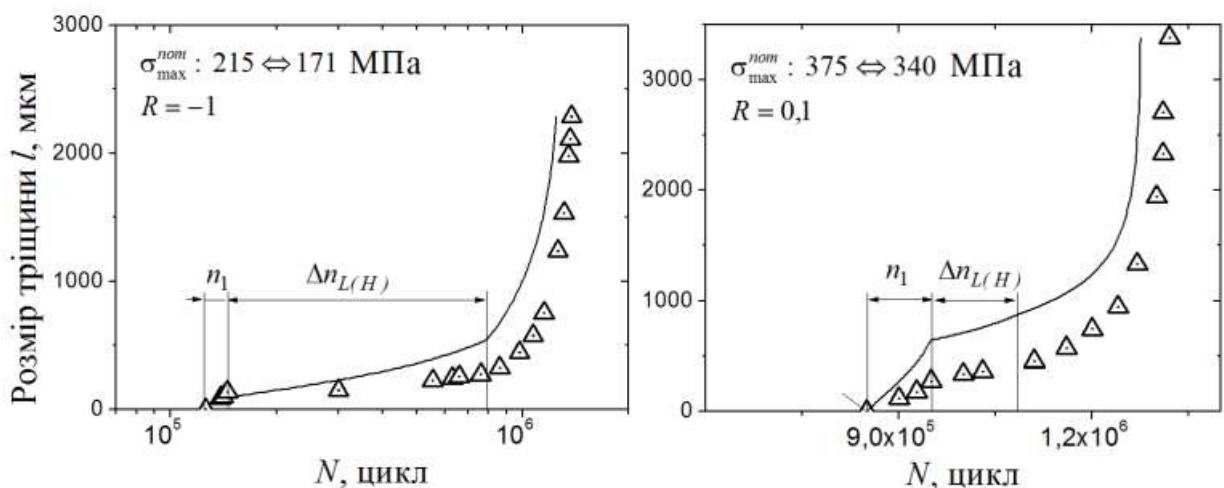


Рисунок 1 – Порівняння результатів розрахунку кінетики росту втомної тріщини від глухого отвору у зразках зі сталі 45 (суцільні лінії) з експериментальними даними (точки).

Висновки. Наукова новизна запропонованої моделі полягає у врахуванні впливу лінійного розміру пластичної зони попереду вістря тріщини, яка утворилась за більшого розмаху напружень циклу, на рівень закриття тріщини під час навантаження меншим розмахом, що приводить до гальмування росту тріщини на певній ділянці. Практичне значення полягає у можливості використання моделі для оцінки ресурсу металевих деталей машин, що працюють в умовах нерегулярного циклічного навантаження і в яких допускається наявність тріщини певного розміру.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Herasymchuk, O. M., & Kononuchenko, O. V. (2024). Theoretical estimation of fatigue life before crack initiation in metal materials at variable cycle stresses. *Strength Mater*, (56), 947–960.
2. Herasymchuk, O. M., & Kononuchenko, O. V. (2023). Model of short fatigue crack growth rate and fatigue life estimation of carbon steel specimens. *Strength Mater*, (55), 683–698.
3. Chan, K. S. (2004). Variability of large-crack fatigue-crack-growth thresholds in structural alloys. *Metall Mater Trans A*, (35A), 3721–3735.



Лурін І.А.¹, Гуменюк К. В.², Кушнар'ов О. П.³, Сіренко В. М.⁴, Фуркало С.О.⁵,

Дзюба А. П.⁶

*1 академік НАМН України, д-р мед. наук, проф., генерал-майор мед. служби
України, Київ, Україна,*

2 канд. мед. наук, доцент, полковник, головний хірург МО України, Київ, Україна,

3 заст. гол. конструктора ДП «КБ «Південне», Дніпро, Україна,

4 канд. техн. наук, нач. комплексу ДП «КБ «Південне», Дніпро, Україна,

5 нач. сектору ДП «КБ «Південне», Дніпро, Україна,

6 д. т. н., професор, ДНУ імені Олеса Гончара, Дніпро, Україна, e-mail:

dzb@ua.fm

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОНИКНЕННЯ ЗАСОБІВ УРАЖЕННЯ В МАТЕРІАЛ, ІМІТУЮЧИЙ БІОЛОГІЧНІ ТКАНИНИ, ТА ТОНКОСТІННІ ЗАХИСНІ ЕЛЕМЕНТИ

Анотація. У роботі подані результати числового моделювання напружено-деформованого стану балістичного матеріалу, який імітує властивості біологічних тканин, при проникненні в нього засобів ураження у вигляді кулі, та дослідження траєкторії її руху у матеріалі. Подані результати числового дослідження процесу наскрізного проникнення кулі через захисні сталеві елементи.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, засоби ураження, проникнення кулі, біологічні тканини, захисні елементи.

Вступ. Досліджуються можливості достовірного використання сучасних засобів скінченно-елементного аналізу для моделювання процесів високошвидкісного проникнення засобів ураження в матеріал, який імітує властивості біологічних тканин [4], а також проби-вання відокремленими уламками сталевих поверхонь циліндричних оболонок, як захисних елементів. Результати числового аналізу порівнюються з даними експериментальних балістичних випробувань, проведених в Державному науково-дослідному експертно-криміналістичному центрі МВС України.

Результати досліджень. Для дослідження застосовується програмний комплекс ANSYS Explicit Dynamics, який дозволяє моделювати значні деформації та руйнування матеріалів під дією короткодійних навантажень та високих тисків [1].

Числове моделювання виконане для двох військових сталевих куль різного



калібру (масою 3,4 г та 9,6 г) і двох свинцевих мисливських спортивних куль (масою 10,9 г та 14,2 г) та швидкостей їх руху 918, 792, 759, 664 (м/сек), відповідно, для спеціального балістичного матеріалу (Ballistic Testing Backing Material) [3].

Загальний вигляд скінченно-елементної моделі балістичного матеріалу зі згущенням сітки та кулі подано на рис. 1, рис. 2, відповідно.

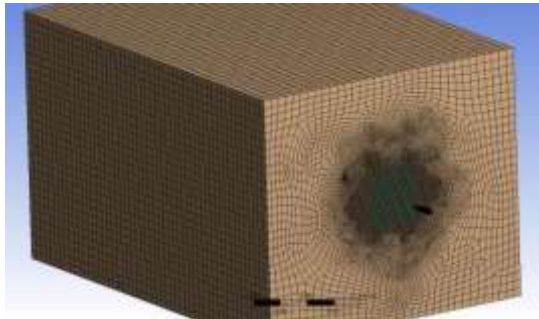


Рисунок 1 – Загальний вигляд елементна скінченно-елементної моделі.

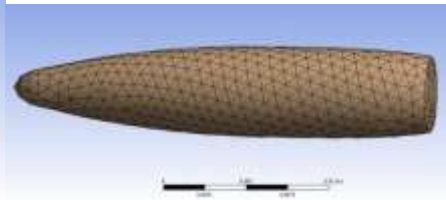


Рисунок 2 – скінченно- модель кулі

В процесі числового моделювання здійснювався контроль загальних переміщень

$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$ де u_x, u_y, u_z – переміщення вузлів; еквівалентних деформацій

$\varepsilon_{\text{екв}} = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{1}{2}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]}$, де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – головні осьові деформації, та еквівалентних напружень по Мізесу.

$\sigma_{\text{міз}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$, де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні осьові напруження.

Загальний вигляд форми пошкодження в матеріалі в двох площинах для кулі 1 подано на рис. 3.

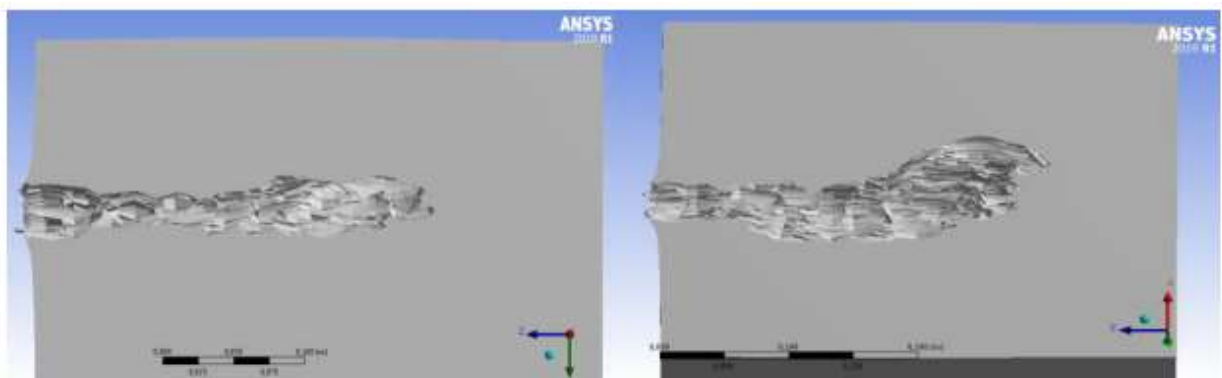


Рисунок 3 – Розрахункові пошкодження в балістичному матеріалі

На рис. 4 подана картина пошкодження, яка була отримана в експериментальній моделі для кулі 1. Проведення порівняльного аналізу розрахункових і експериментальних даних вказують на їх добру збіжність. Аналогічні результати комп'ютерного моделювання проникнення кулі в балістичний матеріал отримані також і для інших варіантів куль.



Рисунок 4 – Пошкодження матеріалу експериментальної моделі

Було проведено великий обсяг числового комп'ютерного моделювання процесу проникнення жорсткої кулі через поверхню сталевих циліндричних оболонок з різною швидкістю і під різними кутами до поверхні оболонки. Картини пошкоджених поверхонь, та картини руйнувань подані на рис. 5.

Отримані залежності зміни енергії при наскрізному проникненні кулі під різними кутами до поверхні оболонки. На рис.6 подані відповідні графіки для випадку початкової швидкості кулі 50 м/с (вертикальна складова вектора швидкості – 25м/с, горизонтальна – 43,3015 м/с) для випадку напрямку її дії під кутом до твірної оболонки.

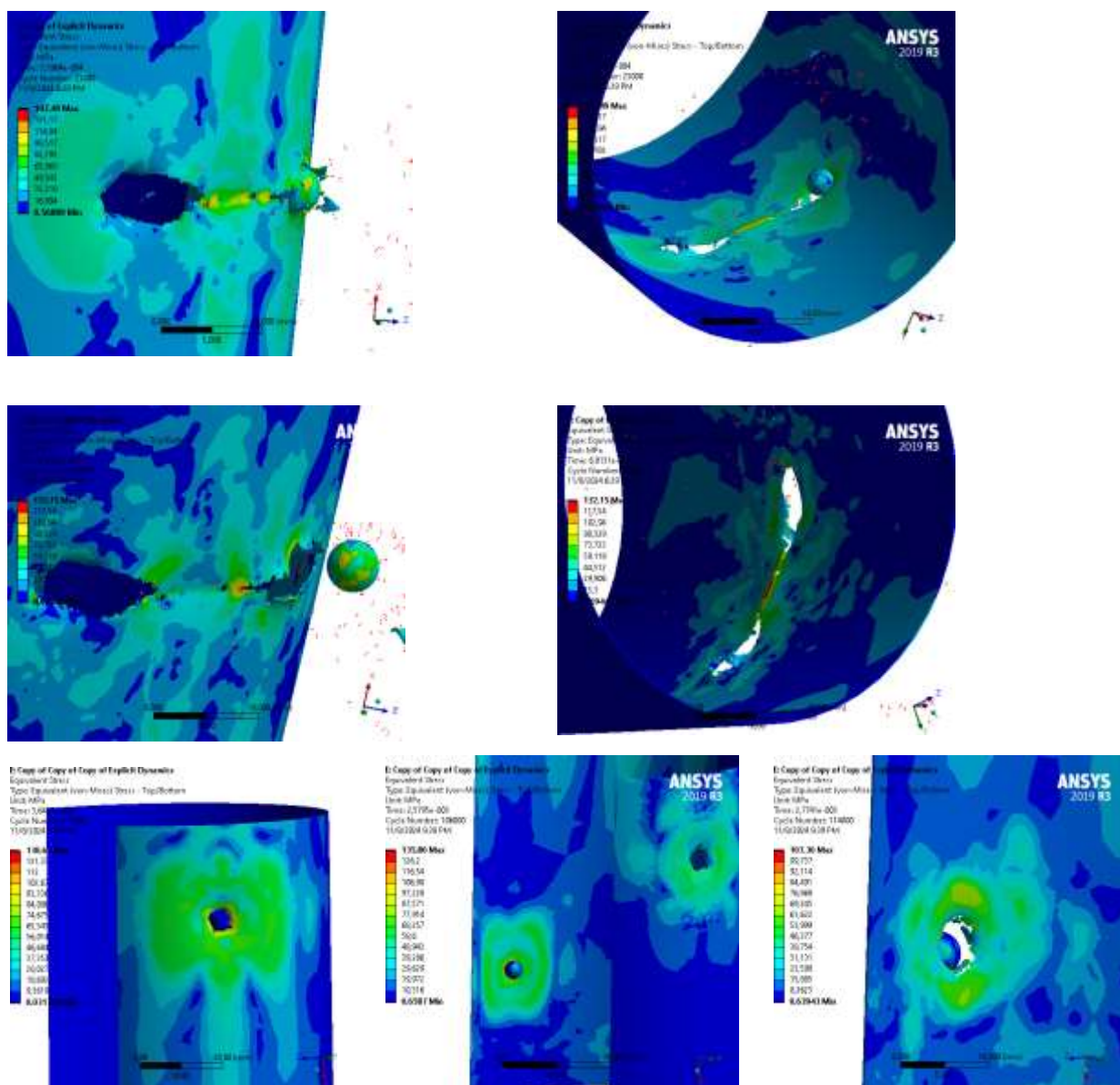


Рисунок 5 – Картини наскрізних руйнувань поверхні циліндричних оболонок

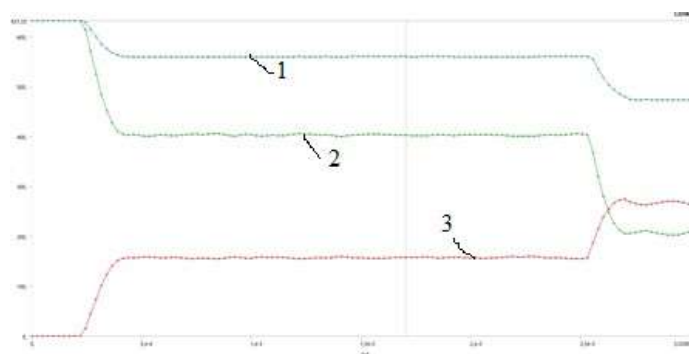


Рисунок 6 – Характер зміни загальної енергії (лінія 1), кінетичної енергії кулі (лінія 2), та внутрішньої енергії системи (потенціальної) (лінія 3)



З приведених графіків видно різку зміну складових енергії при проходженні кулі че- рез перешкоду (поверхню оболонки).

Висновки. Отримані результати вказують на достатню достовірність застосування за- собів скінченно-елементного аналізу. Моделювання процесу проникнення і траєкторії руху кулі в балістичному матеріалі можуть бути використані в хірургії для прогнозування харак- теру реальних поранень, а моделювання наскрізного проникнення через жорстку перешкоду – для створення захисних елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бруяка В.А. Инженерный анализ в ANSYS WORKBENCH (2010) / Уч. пос. Из- во: Самарский гос. техн. ун-т, 271с. ISBN 978-5-7964-1392-0
2. Gad A.I. and Gao X.-L.. Mdeling of deformation of Roma Plastilina № 1 clay in column-drop tests by incorporating the coupler strain rate and temperature effects. (2020) Mechanics of Advanced Materials and Structures. № 13. P. 1154–1166. <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1712629>.
3. Hernandez C., Buchely M.F., Maranon A. Dynamic characterization of Roma Plastilina № 1 from Drop Test and inverse analysis. /International Journal of Mechanical Sciences 100 (2015) P. 158–168. <https://doi.org/10.1016/j-ijmecsci.2015.06009>.
4. Martin L Fackler, MD. Gunshot wound Review. Annals of Emergency Medicine, (august 1996). **28 (2)**. P. 194–203. [https://www.annemergmed.com/article/S0196-0644\(96\)70062-8/abstract](https://www.annemergmed.com/article/S0196-0644(96)70062-8/abstract) .



Максимюк В.А.¹, Ушакова В.С.², Ушаков О.В.³

¹проф.н.с., д.ф.-м.н., с.н.с., Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, Київ,
Україна, volmak@ukr.net

²с.н.с., к.ф.-м.н., с.н.с., Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, Київ,
Україна, creep@inmech.kiev.ua

³заст.нач.центру, Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та
судових експертиз Служби безпеки України, Київ, Україна, nddkr_ict@ssu.gov.ua

ПРО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДАРНИХ ХВИЛЬ У ВОДЯНОМУ КУЛЕУЛОВЛЮВАЧІ

Анотація. Виготовлено спрощений макет циліндричного вертикального кулеуловлювача з орієнтацією на низькоенергетичні кулі. Засобами тензометрії за допомогою 8-канального реєстратора LMS SCADAS Mobile досліджено динаміку деформування зовнішньої поверхні циліндра в шести точках вздовж висоти. Зафіксовано поширення первинної та вторинної ударних хвиль. Обчислено швидкість поширення ударної хвилі у воді.

Ключові слова: циліндричний водяний кулеуловлювач, макет, експеримент, реєстратор LMS SCADAS Mobile, деформації, первинна та вторинна ударні хвилі.

Вступ. Кулеуловлювачі застосовують для експертизи та ідентифікації зброї за слідами на кулях. Кожна зброя залишає унікальний слід кулі, що сприяє розкриттю злочинів. За кулею можна встановити власника зброї. За інтенсивного використання кулеуловлювачі можуть виходити з ладу, особливо у випадках високоенергетичних куль.

Теоретичною основою розрахунків водяних кулеуловлювачів є задача про удар твердих тіл об поверхню рідини, яка досліджувалась понад століття [1]. Конструктори кулеуловлювачів надають перевагу теоретико-експериментальним або чисто експериментальним методам [2]. Вітчизняні конструктори також притримуються таких підходів [3]. Більшість публікацій в цій галузі стосується патентознавства, в яких механічні явища в кулеуловлювачах не розглядаються. Тому експериментальне дослідження динамічних механічних явищ в корпусі кулеуловлювача і в рідині є актуальним.

Матеріал і результати досліджень. 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 (рис. 1) вібраційних, акустичних і тензосигналів LMS SCADAS Mobile (Бельгія).



На основі попередньої верхньої оцінки було виготовлено спрощений експериментальний макет вертикального кулеуловлювача. Для вимірювання деформацій ε на зовнішню поверхню сталеві труби висотою (l) 2 м, діаметром (d) 0,2 м і товщиною стінок (h) 5 мм було наклеєно вздовж висоти ряд тензорезисторів з базою 3 мм і опором 120 Ом. Маса труби з водою становила понад 100 кг. Відстрілювались кулі масою 7,45 г з початковою швидкістю 360 м/с.



Рисунок 1 – Реєстратор LMS SCADAS Mobile

На рис. 2 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 осцилограм.

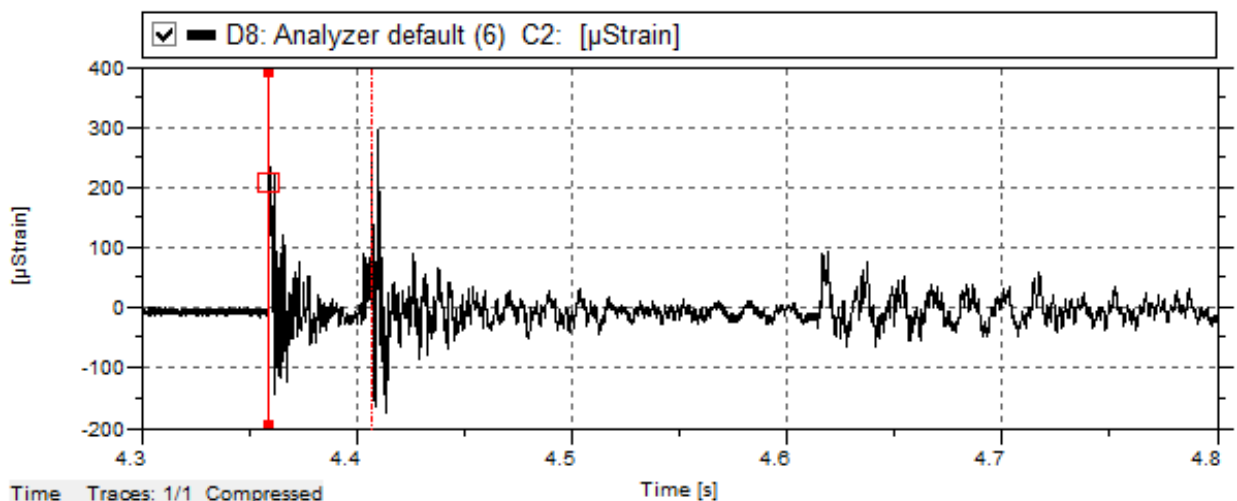


Рисунок 2 – Колові деформації на зовнішній поверхні циліндра

На цій та інших осцилограмах спостерігались по три локальні сплески максимальних деформацій півшириною біля 0,5 мс (час t відраховується від початку запису приладом), що свідчить про поширення ударної хвилі в трубі. Перші сплески ($t_1 \approx 4,35$ с) відповідають моментам проходження фронту ударної хвилі. Другі сплески ($t_2 \approx 4,4$ с) виникають через порівняно короткий проміжок часу $\Delta t_{12} = 0,047$ с після перших, що було встановлено за допомогою вертикальних курсорів (рис. 2). Треті сплески ($t_3 \approx 4,6$ с) виникають через довший проміжок часу $\Delta t_{13} = 0,257$ с.



Треті сплески 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. За час $\Delta t_{13} = 0,257$ с конструкція встигає піднятися й опуститися з висоти $\Delta H \approx 8,2$ см, що узгоджується з візуальним спостереженням.

В подібному експерименті [4] в сталений резервуар з водою розміром 60 см×60 см×80 см і товщиною 5 мм вертикально відстрілювались кулі калібром 5,7 мм і масою 2,67 г з початковою швидкістю 352 м/с. На рис. 3 наведено зміну в часі тиску у воді. Цифри означають: 1 - первинна ударна хвиля від початкового удару кулі об поверхню води; 2 - негативний тиск у порожні за кулею, 3 – вторинна ударна хвиля, породжена колапсом порожнини. Вторинна хвиля виникає приблизно через 7 мс після первинної. На підставі оптичних спостережень автори пояснили появу вторинної ударної хвилі явищем суперкавітації. В нашому випадку повторна ударна хвиля приходила через 47 мс.

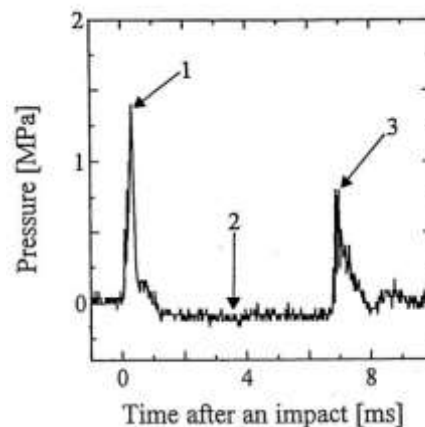


Рисунок 3 – Первинна (1) і вторинна (3) ударні хвилі [4]

Висновки. Таким чином, попереду кулі біжить ударна хвиля, яка викликає деформування, де ще кулі нема. Тобто вода на удар реагує як тверде тіло, практично миттєво передаючи деформацію на всю трубу. Для зменшення деформацій доцільно збільшувати всі геометричні розміри кулеуловлювача, включаючи його довжину.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Truscott, T. T., Epps, B. P., & Belden, J. (2014). Water entry of projectiles. *Annual review of fluid mechanics*, 46(1), 355-378.
2. Werner, D., Rhumorbarbe, D., Kronseder, P., & Gallusser, A. (2018). Comparison of three bullet recovery systems. *Forensic science international*, 290, 251-257.



3. Ганзюк, А. Л., Кравчук, О. В., & Гордєєв, А. І. (2023). Особливості будови, розрахунку та експлуатації гідрокулеуловлювачів. *Криміналістичний вісник*, 40 (2), 7–15.
4. Shi, H. H., & Kume, M. (2001). An experimental research on the flow field of water entry by pressure measurements. *Physics of Fluids*, 13(1), 347-349.



Цибаньов Георгій

головний науковий співробітник, д-р техн. наук, Інститут проблем
міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, м.Київ, Україна, e-mail:

tsybanov@ukr.net

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЧАТКОВОГО ДЕФЕКТУ МАТЕРІАЛУ ПРИ РОЗРАХУНКАХ ЦИКЛІЧНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ

Анотація. Експоненціальна залежність для опису роста тріщини втоми застосована для визначення початкового дефекту матеріалів при розрахунках багатоциклової довговічності. Для цього використано експериментальні дані для побудови кривої втоми і розрахункова лінія Френча. На прикладі сталі 34CrMo4 показано зміну рівня початкового дефекту у залежності від амплітуди напружень, що пов'язано з особливостями формування субструктури за дії напружень різного рівня.

Ключові слова: крива втоми, стадії втомного пошкодження, лінія Френча, мікроструктура.

Вступ. Втомне руйнування матеріалів є багатостадійним процесом. Стадії зародження і росту коротких тріщин при багатоцикловій втомі можуть займати більшу частину довговічності матеріалів, тому для прогнозування тривалості їх протікання, а також при оцінці залишкового ресурсу конструкційних елементів необхідно використовувати характеристики, що описують швидкість та кінетику втомного пошкодження на перших двох стадіях. У дослідженнях [1] показано зв'язок росту коротких тріщин з циклічною пластичною деформацією і запропоновано метод визначення довговічності за ростом коротких тріщин, параметри росту яких визначаються за параметрами кривої Коффіна-Менсона. При цьому відлік росту починається з фіксованого розміру початкової тріщини a_0 , який визначається екстраполяцією експериментальних значень кінетики коротких тріщин на різних рівнях амплітуди напружень на циклічне напрацювання $N=0$ цикл. В той же час з даних [1] витікає відхилення значень a_0 на різних рівнях амплітуди напружень σ_a . У представленому дослідженні встановлено закономірність зміни початкової тріщини (дефекту) a_0 за різних значень σ_a , що дозволяє більш обґрунтовано описувати кінетику росту мікроструктурно короткої тріщини на початковій стадії втомного пошкодження.



Результати досліджень. У роботах [1-3] показано, що експериментальні дані росту втомних тріщин (вимірюваних як найбільш довгої поверхневої тріщини на різних рівнях

σ_a) при їх зростанні в діапазоні $2 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-3}$ м добре апроксимуються експоненціальною залежністю. Пряма лінія в напівлогарифмічних координатах відповідає залежності:

$$a = a_0 \exp(k_1 N) \quad (1)$$

де a , N - поточні значення довжини тріщини та поточного числа циклів навантаження; a_0 - довжина тріщини при екстраполяції N на нуль циклів; k_1 - коефіцієнт пропорційності. Рівняння (1) є розв'язком диференціального рівняння:

$$da = k_1 \cdot a dN. \quad (2)$$

Рішення рівняння (2) з послідовним інтегруванням при проростанні тріщини від її значення при $N = 0$ (фіктивна тріщина розміром a_0) до руйнування при $N = N_f$ (довжина тріщини при руйнуванні зразка - a_f) дозволяє визначити число циклів навантаження до руйнування за залежністю:

$$N_f = \frac{1}{k_1} \ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right). \quad (3)$$

Раніше було показано [4], що значення k_1 можуть бути визначеними за параметрами модифікованої кривої втоми: $k_1 = \sigma_a^m \cdot C^{\frac{1}{k}} \cdot \ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right)$, де k і C - параметри кривої втоми.

З (3) визначимо, що $k_1 = \frac{1}{N_f} \ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right)$ для розрахованої довговічності по кривій втоми N_{f1} на рівні σ_{a1} $N_{f1} = \left(\frac{C}{\sigma_{a1}} \right)^{\frac{1}{k}}$ і розрахованій згідно [5] довговічності до лінії Френча $N_{Fr1} = \left(\frac{C_{Fr}}{\sigma_{a1}} \right)^{\frac{1}{k_{Fr}}}$ (C_{Fr} і k_{Fr} - параметри кривої втоми за критерієм зародження тріщини, тобто, лінії Френча) можна записати два рівняння для k_1 на заданому рівні амплітуди $k_1 = k_{11}$ з різними величинами відношень розмірів тріщин $\ln \left(\frac{a_d}{a_0} \right)$ і $\ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right)$. Відношення $\left(\frac{a_d}{a_0} \right)$

відповідає стадії зародження тріщини розміром a_d від поверхні до границі мікроструктурного міцного бар'єру (границя зерна). Прирівнявши k_{11} для N_{Fr1} і N_{f1} , маємо рівняння для визначення початкового дефекту за заданої довговічності:

$$\frac{1}{N_{Fr1}} \ln \left(\frac{a_d}{a_0} \right) = \frac{1}{N_{f1}} \ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right). \quad (4)$$

Після перетворень (4) розмір початкового дефекту визначиться наступною залежністю:



$$\ln(a_0) = \left[\ln(a_d) - \frac{N_{Fr1}}{N_{f1}} \cdot \ln(a_f) \right] / \left(1 - \frac{N_{Fr1}}{N_{f1}} \right). \quad (5)$$

Отже, розмір початкового дефекту матеріалу за різних амплітуд напружень може бути розрахований за наявних кривої втоми, лінії Френча і розміру мікроструктурної одиниці матеріалу (розмір зерна, планки бейніту або мартенситу [6]). У роботі [5] одержано наступні рівняння модифікованої кривої втоми і лінії Френча для сталі 34CrMo4 у стані після електрополірування:

$$(\sigma_a - \sigma_d) N^{0,3877} = 23913,88; \quad (6)$$

$$(\sigma_a - \sigma_d) N_{Fr}^{0,2545} = 3477,87, \quad (7)$$

де $\sigma_d = 0,707\sigma_{-1}$ – пошкоджуюче напруження у модифікованій кривій втоми [5], σ_{-1} – границя витривалості за симетричного циклу навантаження. У таблиці наведено результати розрахунку значень a_0 для багатоциклової втоми при розмірі мікроструктурної одиниці дослідженої сталі $a_d = 9$ мкм і при $a_f = 1500$ мкм.

Таблиця – Результати визначення розміру початкового дефекту сталі 34CrMo4

σ_a , МПа	N_{Fr} , цикл	N_f , цикл	N_{Fr}/N_f	$\ln(a_0)$	a_0 , мкм
687,09	7383	50002	0,14765	1,31096	3,70975
600	21885	102043	0,21446	0,80043	2,22651
550	48401	171815	0,28170	0,19081	1,21023
500	131005	330310	0,39661	-1,16557	0,31174
462	346341	625289	0,55388	-4,15478	0,01569

Як видно, за зміни напружень від границі витривалості ($\sigma_{-1} = 462$ МПа) до рівня напружень малоциклової втоми величина початкового дефекту суттєво змінюється. Така зміна пояснюється особливостями формування субструктури за різних рівнів напружень: високі напруження формують достатньо грубу субструктуру, а низькі – більш тонку.

Висновки. Одержані результати показують можливість визначення початкового дефекту матеріалу, який може бути використаний для розрахунку пошкодження на стадії росту тріщини від a_0 до границі міцного мікроструктурного бар'єру (a_d). Цей результат може бути використаний при вивченні природи втоми матеріалів, пов'язаної з кінетикою формування субструктури. Очевидно, що для практичного використання розробки необхідно розвивати подібний підхід за наявності концентраторів напружень різного рівня.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Polak J. (2005). Plastic strain-controlled short crack growth and fatigue life. *Int. Journ. Fat.*, 27, 1192–1201.
2. Jiša D., Liškutin P., Kruml T., Polak J. (2010). Small fatigue crack growth in aluminium alloy EN-AW 6082/T6. *Int. Journ. Fat.*, Vol. 32., 1913–1920.
3. Цибанєв Г.В. (2013). Застосування деформаційного критерію для опису росту коротких втомних тріщин. *Проблеми міцності*, №1, 43-52.
4. Tsybanev G. V. (2023). Discription of the kinetics of short surface fatigue crack growth using the parameters of fatigue curves. *Strength of Materials*, Vol. 50, No. 2, 308-316.
5. Цибаньов Г.В. (2023). Розрахункове визначення лінії Френча (ЛФ) сталей з використанням експериментальних даних для побудови кривої втоми. *Повідомлення 1. Проблеми міцності*, №3, 48–59.
6. Chapetti M.D. (2003). Fatigue propagation threshold of short cracks under constant amplitude loading. *Int. Journ. Fat.*, Vol. 25, 1319–1326.



Бейцун В. С.¹, Дзюба А. П.², Тарасов С. В.³

¹аспірант, ДНУ ім. О. Гончара; інженер, ІТСТ НАНУ, Дніпро, Україна, e-mail: beitsun98@gmail.com

²д. т. н., професор, ДНУ ім. О. Гончара, Дніпро, Україна, e-mail: dzub@ua.fm

³к. т. н., с. н. с., ІТСТ НАНУ, Дніпро, Україна, e-mail: tsvtransmag@gmail.com

РОЗРОБКА МАНІПУЛЯТОРА КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ІЗ РАЦІОНАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Анотація. Запропоновано методологію удосконалення параметрів конструкції багатоланкового маніпулятора космічного призначення. Приведені результати числового аналізу та експериментальних досліджень континуальної податливості елементів та локальних зон підвищеної податливості, зокрема у шарнірних вузлах і фланцевих з'єднаннях маніпулятора. Напрацьовані рекомендації до вибору раціональних параметрів маніпулятора.

Ключові слова: космічний маніпулятор, податливість, кінематичне керування, експериментальне моделювання, фотограмметрія.

Вступ. В умовах космічного простору, застосування маніпуляторів спеціального призначення з оптимальними параметрами є надзвичайно актуальними. Такі маніпулятори використовуються для виконання складних завдань, таких як монтаж і демонтаж обладнання, управління супутниками, маніпулювання з сітчастими антенами, науковими приладами та іншими корисними вантажами в умовах екстремальних навантажень при відсутності атмосфери (космічного вакууму) і зниженої сили тяжіння. Такі маніпулятори складаються з послідовно з'єднаних між собою шарнірними чи фланцевими вузлами пружних стрижнів, що утворюють рухома механічну структуру. Особливістю багатоланкових маніпуляторів космічного призначення є вимоги до високої точності виконаних ними рухів.

Внутрішні пружні сили та моменти в гнучких стрижнях маніпулятора мають прагнення відновити початкову форму після таких деформацій, з урахуванням їхньої податливості, сил реакцій в шарнірах та з'єднаннях, особливостей взаємодії між ланками, що забезпечують кінематичні обмеження. З урахуванням сил внутрішнього демпфування, що сприяють частковому поглинанню енергії коливань і їхньому згасанню, зменшуючи ризик неконтрольованих вібрацій.



Зовнішні сили виникають в результаті впливу на маніпулятор гравітаційних полів у зв'язку з рухом космічного апарату (КА). Однією з найбільших проблем є виникнення сил інерції під час поворотів чи зупинок КА, коли маніпулятор виконує операції, такі як розкриття, зміна положення корисного вантажу (КВ) або швидкості руху маніпулятора та ін.; в умовах дії закону збереження кількості руху, що можуть спричиняти виникнення інерційних сил. Ці сили діють на всі ланки маніпулятора, що не тільки викликають додаткові навантаження на його структуру, але і ускладнюють стабілізацію приладів, закріплених на інших консолях маніпулятора, що потребує ретельного аналізу напружень, переміщень та податливостей для забезпечення стабільності та безпеки.

Крім того, важливим є врахування сил, що виникають при розкладанні маніпулятора з сітчастою антеною [1-3] чи іншим КВ. У такому випадку відбувається зміна геометрії системи та тензора інерції, що призводить до модифікації динамічних характеристик маніпулятора та вимагає адаптації алгоритмів управління і точного моделювання його поведінки під час роботи.

У поданій роботі запропонована методика розробки маніпулятора з раціональними параметрами шляхом застосування комплексного аналізу динамічних характеристик та податливостей конструкції, її шарнірних і фланцевих з'єднань.

Результати досліджень. Модель пружного маніпулятора космічного призначення розглядається як стрижнева система з елементами конструкції, з'єднаними за допомогою шарнірних вузлів і фланцевих з'єднань (рис. 1). Синьою фігурою зображено КА, червоною – КВ, що імітує параболічну антену у складеному вигляді; іншими кольорами – ланки космічного маніпулятора. Така конструкція забезпечує багатофункціональність системи, необхідної для адаптації її конфігурації відповідно до поставлених завдань та виконання технологічних операцій, транспортування та позиціонування КВ у просторі.

Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) дозволяє отримати локальні жорсткісні та податливі характеристики стрижневих елементів маніпулятора, з врахуванням змінного перерізу, анізотропії матеріалу та граничних умов. Для дослідження континуальної податливості було проведено комп'ютерне моделювання модального аналізу для спрощеної моделі маніпулятора без фланців та шарнірних вузлів. До уваги приймалися перші шість форм вільних коливань. Оскільки перша форма власних коливань має найнижчу частоту і найбільш просту форму вигину, вона була знайдена та оцінена як аналітично, за допомогою емпіричних формул, так і чисельно. Порівняння першої форми вільних коливань консольної балки з вантажем на кінці,



отриманої при розрахунку у Ansys, виконувалось за допомогою емпіричної формули Ірвіна [4]. Відносна похибка результатів склала 0,35%.

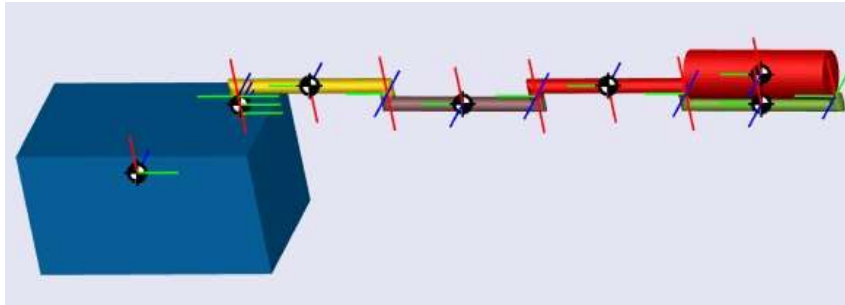


Рисунок 1 – Схема маніпулятора з КА та КВ

Податливість шарнірних вузлів досліджувалась за допомогою фотограмметричного методу з використанням контрольних точок-мішеней. Методика передбачає відстеження траєкторій суміжних ланок, з'єднаних шарніром, та їх подальше порівняння з траєкторіями моделей під час імітаційного моделювання. Відхилення від еталонної траєкторії інтерпретувалось як прояв люфта або податливості шарніра. Результати експерименту показали високу точність фотограмметричного методу.

Визначення впливу податливості фланцевого з'єднання на локальну жорсткість маніпулятора проводилось за допомогою експериментальних методів механіки деформівного твердого тіла шляхом випробування на згинання, кручення та розтяг-стиск. Результати експериментів використовуються для більш коректного застосування методу скінченних елементів з метою оптимізації параметрів та аналізу поведінки конструкцій.

Висновки. Побудована методологія чисельно-експериментального визначення впливу континуальної та пружних податливостей шарнірних вузлів, фланцевих з'єднань багатоланкових конструкцій та механізмів маніпуляторів може бути корисною для підвищення точності моделювання динаміки, вдосконалення алгоритмів керування та оптимізації конструкцій роботизованих систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Khoroshylov S. V., Shamakhanov V. K. , Beitsun V. S., et al. (2023). Dynamics modelling and analysis of the deployable reflector antenna for sar mini-satellites. 41st ESA Antenna Workshop on Large Deployable Antennas (25 - 28 September 2023). – Noordwijk, The Netherlands: ESAESTEC. Pp. 1-6.



2. Sun Z., Zhang Y., Yang D. (2021). Structural design, analysis, and experimental verification of an H-style deployable mechanism for large space-borne mesh antennas. *Acta Astronautica*, (178), 481-498.
3. Sushko O., Medzmariashvili E., Filipenko F., et al. (2021). Modified design of the deployable mesh reflector antenna for mini satellites. *CEAS Space J.*, 13 (4), 533 – 542.
4. Vibrationdata Structural Dynamics - Beam Vibration. Tom Irvine: веб-сайт.
URL:
<https://www.vibrationdata.com/beams.htm>.



Іщенко Анатолій¹, Девін Леонід², Рассохін Дмитро³, Носовська Олена⁴,

Капустін Станіслав⁵

¹ д.т.н., проф., кафедра підйомно-транспортних машин і деталей машин:

Секція механічного обладнання заводів чорної металургії при кафедрі ПТМіДМ, ДВНЗ

«ПДТУ», м. Дніпро, Україна, e-mail: ischenko50@ukr.net

² д.т.н., проф., директор навчального центру НТУУ “КПІ” – ІНМ ім. В.М.

Бакуля НАН Україн, зав. лабораторією надійності інструментів з надтвердих

матеріалів. e-mail: ldevin350@gmail.com

³ к.т.н., доц., науковий співробітник кафедри легких конструкцій з композитних

матеріалів, Лейпцизький університет прикладних наук, м. Лейпциг, Німеччина, e-mail:

Dmytro.rassokhin@htwk-leipzig.de

⁴ к.т.н., доц., кафедра підйомно-транспортних машин і деталей машин: Секція

механічного обладнання заводів чорної металургії при кафедрі ПТМіДМ, ДВНЗ

«ПДТУ», м. Дніпро, Україна, e-mail: nosovska_o_v@pstu.edu

⁵ аспірант кафедри підйомно-транспортних машин і деталей машин: Секція

механічного обладнання заводів чорної металургії при кафедрі ПТМіДМ, ДВНЗ

«ПДТУ», м. Дніпро, Україна, e-mail: stanislav.kapustin.engineer@gmail.com

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ВІТЧИЗНЯНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПОЛІУРЕТАНОВІЙ ОСНОВІ: ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ДК2 І АК.UR-03

Анотація. У дослідженні представлено порівняльний аналіз композитних матеріалів на поліуретановій основі, та встановлено міцність при стисненні та ступінь деформації зразків. Результати свідчать про переваги матеріалу ДК2 (ПДТУ) порівняно з АК.UR-03 («Капітел», Дніпро). Міцність на стиск: матеріал ДК2 - 209 МПа, матеріал АК.UR-03 - 170 МПа.

Ключові слова: композитні матеріали; поліуретанова основа; стиснення; деформація.

Вступ. Сучасна інженерія висуває високі вимоги до матеріалів, що використовуються в конструкціях, які забезпечують захист обладнання від різних видів механічних впливів. Композитні матеріали на поліуретановій основі займають важливе місце завдяки своїм унікальним властивостям: поєднанню легкості, високої міцності та



стійкості до динамічних навантажень. Однак, під час вибору матеріалу для конкретних інженерних завдань критично важливо враховувати не тільки механічну міцність, а й здатність матеріалу до деформації (зім'яття), що безпосередньо впливає на його експлуатаційні характеристики за екстремальних умов [1-2]. У даній роботі проводяться порівняльні випробування двох вітчизняних композитних матеріалів - ДК2, розробленого в ПДТУ, і АК.UR-03, що випускається фірмою «Капітел» (Дніпро). Мета дослідження полягає у визначенні характеристик міцності матеріалів під час стискання, а саме у вимірюванні граничної міцності та ступеня зминання зразків, що дасть змогу зробити обґрунтований вибір матеріалу для використання в захисних конструкціях [3-4].

Матеріал і результати досліджень. Для проведення випробувань було підготовлено зразки у вигляді шайб із заданими геометричними параметрами: діаметр: 12 мм, товщина: 2,1 та 1,61 мм. Різниця у розмірах пов'язана з усадкою матеріалу під час затвердження (рис.1).



Рисунок 1 – Сформовані за допомогою пластикового шприца дослідні зразки сірого кольору - АК.UR-03 («Капітел», Дніпро), та зеленого кольору - ДК2 (ПДТУ).

Випробовувані матеріали:

- ДК2: вітчизняний композитний матеріал, розроблений у ПДТУ.
- АК.UR-03: композитний матеріал на поліуретановій основі, вироблений фірмою «Капітел» (Дніпро).

Обладнання та методика випробувань

Випробування проводилися на експериментальній установці Інституту надтвердих матеріалів ім. Бакуля. Основне обладнання включало:



- Гідропрес потужністю 10 тонн - для створення необхідного стискаючого навантаження.

- Еталонний динаметр ДС 5 - для точного вимірювання прикладеної сили.

Навантаження на зразки збільшували покроково згідно з таким набором значень сили (F , кН): 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 кН.

При кожному прирості навантаження проводилося вимірювання поточної товщини зразка, що давало змогу визначити ступінь зминання (відносну деформацію) матеріалу. Такий поетапний метод дозволив не тільки оцінити граничну міцність матеріалу, а й проаналізувати його деформованість під дією екстремальних навантажень.

Таблиця 1 – Результати навантаження композитних матеріалів

Навантаження, кН	ДК2			АК.UR-03		
	Товщина зразка, мм	Деформація, мм	Діаметр зразка, мм	Товщина зразка, мм	Деформація, мм	Діаметр зразка, мм
0	2,10	0,00	12,0	1,61	0,00	10,5
5	1,95	0,15	12,5	1,42	0,19	11,00
10	1,87	0,23	12,7	1,20	0,41	12,00
15	1,80	0,30	13,0	1,05	0,56	12,80
20	1,75	0,35	13,2	0,93	0,68	14,00
25	1,71	0,24	13,3	0,86	0,56	14,50
30	1,66	0,21	13,5	0,82	0,38	15,00

Висновки. Проведене дослідження порівняльного аналізу міцнісних характеристик вітчизняних композитних матеріалів на поліуретановій основі продемонструвало значні переваги матеріалу ДК2 порівняно з АК.UR-03. Під час стискання ДК2 показав максимальну міцність 209 МПа та відносну деформацію 12,5 % при навантаженні 30 кН, тоді як АК.UR-03 продемонстрував міцність 170 МПа та відносну деформацію 43 %. Такі результати вказують на доцільність використання матеріалу ДК2 в конструкціях, що вимагають високої міцності та мінімальної деформації під навантаженням. Подальші дослідження, спрямовані на вивчення інших експлуатаційних



характеристик матеріалу ДК2, дадуть змогу оптимізувати його застосування в інженерних системах і підвищити надійність захищених конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іщенко, А., & Підплетний, В. (2000). Ремонт прокатного обладнання металополімерних матеріалів. *Прокатне виробництво*, № 6, 25–27.
2. Іщенко, А., Рассохін, Д., & Носовська, О. (2023). Відновлення прокатного обладнання за допомогою композитних матеріалів. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (46), 55–61. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.2881253>.
3. Bhuvaneswari, V. (2023). Chapter One—Recent advancements in polymer composites for damage repair applications. *In Polymer Composite Systems in Pipeline Repair*, 1–26
4. Wang, C.-M., Ping, X.-C., & Wang, X.-X. (2022). Effects of local fiber discontinuity on the fatigue strength parameter at the fiber inclusion corner in fiber-reinforced composites. *Sci. Eng. Compos. Mater.* 29, 274–286



Пілюгін Євгеній.¹, Ротт Наталія²

¹асистент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, НТУ

«Дніпровська політехніка, Дніпр, Україна e-mail: piliuhyn.y.d@nmu.one

²доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, к.т.н., доцент,
НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: rott.n.o@nmu.one

ДО МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ У СЕРЕДОВИЩІ З ОСОБЛИВОСТЯМИ

Анотація. У роботі розглядаються методичні підходи до експериментального дослідження розподілу температури в бетонному середовищі, армованому композитною арматурою. Основна увага зосереджена на особливостях теплопровідності композитних матеріалів порівняно з традиційною сталевую арматурою, що суттєво впливає на формування температурного поля в бетоні під дією зовнішніх температурних навантажень.

Ключові слова: бетон, залізобетон, композитні матеріали, високі температури

Вступ. У сучасному будівництві все більшого поширення набуває використання композитної арматури як альтернативи традиційній сталевій, зважаючи на її корозійну стійкість, малу вагу та високу міцність[1]. Разом із тим, впровадження нових матеріалів у бетонні конструкції потребує ґрунтовного дослідження їхніх теплофізичних властивостей, особливо в умовах впливу високих або змінних температур.

Температурний режим у тілі бетонної конструкції суттєво впливає на її міцність, тріщиностійкість та довговічність. Відомо, що сталева арматура активно бере участь у процесах теплопередачі, тоді як композитна — має інші характеристики теплопровідності, що може змінювати характер розподілу температур у бетоні.

Актуальність даного дослідження полягає в необхідності розробки методики експериментального вивчення температурного поля в бетоні з урахуванням типу армування. Отримані результати дозволять дати відповідь на питання про доцільність та умови використання композитної арматури в конструкціях, що працюють в умовах підвищених температур або пожежного навантаження.

Матеріал і результати досліджень. Для проведення дослідження було виготовлено серію зразків у вигляді бетонних кубів розміром 100×100×100 мм. В якості армованого елемента використано два типи арматури: склопластикову (композитну) та



традиційну сталеву. Кожен тип арматури застосовувався у двох варіантах конфігурації розміщення всередині бетонного тіла (рисунок 1):

- Варіант А: арматура довжиною 100 мм, обидва кінці відкриті (виходять за межі куба);
- Варіант Б: арматура довжиною 85 мм, один кінець відкритий, інший повністю заглиблений у бетон.

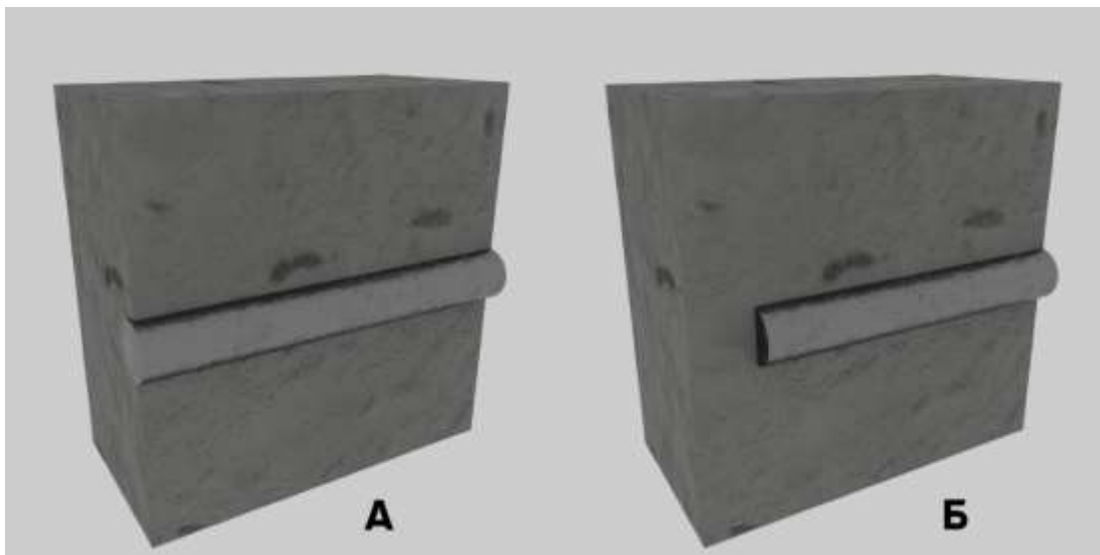


Рисунок 1 – Бетонний куб в розрізі: А- довжина арматури 100 мм, Б- довжина арматури 85 мм

Кількість зразків у кожній підгрупі становила три одиниці для забезпечення відтворюваності результатів. У кожному зразку було встановлено три температурні датчики (термопари), розташовані в таких точках (рисунок 2).

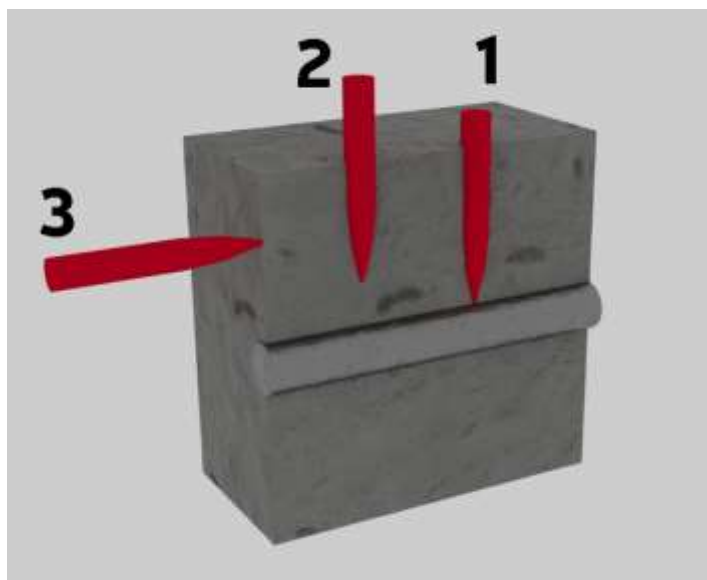


Рисунок 2 – Місце розташування термодатчиків

У подальшому зразки будуть піддані контрольованому тепловому навантаженню, з фіксацією температури в реальному часі. Збір даних дозволить встановити вплив теплофізичних властивостей матеріалу арматури на характер теплопередачі в бетоні.

На момент підготовки матеріалу результати експерименту ще обробляються. Очікується, що отримані дані дозволять сформулювати якісні висновки щодо доцільності застосування композитної арматури у конструкціях, що працюють в умовах змінного або підвищеного температурного впливу.

Висновки. Запропоновано методику експериментального дослідження розподілу температури в бетонних конструкціях із різними типами арматури, яка враховує варіанти розміщення арматурних елементів та положення контрольних точок вимірювання температури. Конструктивна схема зразків (бетонні куби з вмонтованою арматурою та системою термодатчиків) дозволяє локалізовано фіксувати температурні зміни в обраних зонах та простежувати вплив теплофізичних властивостей арматури на загальний тепловий режим у бетоні.

Встановлено, що вибір типу арматури (композитна чи сталева) та її положення (відкрита чи повністю занурена) є важливими чинниками, які можуть впливати на поширення тепла в бетонному середовищі, особливо в умовах підвищених температур або локального нагрівання.

Отримані під час експерименту дані (на момент підготовки — в обробці) дозволять у подальшому:

- кількісно порівняти ефективність теплопроводу через арматуру різного типу;
- оцінити ступінь впливу армування на локальні температурні градієнти;
- створити уточнені моделі теплопередачі для подальшого інженерного аналізу бетонних конструкцій з новітніми армувальними матеріалами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пілюгін Є.Д., Ротт Н.О. (2024) Перспективи застосування композитної арматури в будівельній галузі №107 62-68 р. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.62>



СЕКЦІЯ 3. МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ І МАТЕРІАЛІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.

Григоренко Олександр¹, Рожок Лілія², Сперкач Світлана³, Безугла Анна⁴

¹завідувач відділу, доктор фіз.-мат. наук, член-кореспондент НАН України,
Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАНУ, м. Київ, Україна, e-mail:

ayagrigorenko1991@gmail.com

²професор, доктор фіз.-мат. наук, професор, Національний транспортний
університет, м. Київ, Україна, e-mail: teormex.ls@gmail.com

³директор, кандидат фіз.-мат. наук, Технічний центр НАН України, м. Київ,
Україна, e-mail: svetlana@nasu.kiev.ua

⁴молодший науковий співробітник, кандидат фіз.-мат. наук, Технічний центр
НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: bezuglaya.anna24@gmail.com

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТРИШАРОВОГО СУЦІЛЬНОГО ЦИЛІНДРА З НЕПЕРЕРВНО-НЕОДНОРІДНИМ ЗАПОВНЮВАЧЕМ ЗА РІВНОМІРНОГО СТИСКУ БІЧНОЇ ПОВЕРХНІ

Анотація. Пружні циліндричні тіла широко використовуються при створенні конструкцій спеціального призначення. На основі методів сплайн-апроксимації функцій та дискретної ортогоналізації, розв'язано вісесиметричну задачу лінійної теорії пружності та досліджено напружений стан суцільних тришарових циліндрів з ізотропними внутрішнім і зовнішнім та неперервно-неоднорідним середнім шаром, що знаходяться під дією рівномірного бічного стиску, в залежності від товщини середнього шару, довжини циліндрів для шарнірного і жорсткого закріплення торців.

Ключові слова: вісесиметрична задача, лінійна теорія пружності, неперервно-неоднорідний заповнювач, сплайн-апроксимація, суцільні шаруваті циліндри, чисельний метод,.

Вступ. Створення новітніх матеріалів, поєднання різноманітних структур для виготовлення конструктивних елементів спеціального призначення потребує проведення чисельного експерименту з метою передбачення їх поведінки у складних умовах експлуатації. В залежності від поставлених вимог, за математичну модель такого



експерименту, дуже часто обирають порожнисті та суцільні циліндри [1]. Важливого значення при цьому набуває вибір відповідного підходу для розв'язання поставленої проблеми [2]. В даній роботі, на основі методу сплайн-апроксимації та чисельного методу дискретної ортогоналізації [3], досліджується напружений стан суцільних тришарових циліндрів скінченної довжини з неперервно-неоднорідним заповнювачем, за рівномірного бічного стиску при шарнірному і жорсткому закріпленні торців.

У рамках вісесиметричної задачі лінійної теорії пружності, побудовано розв'язувальну систему диференціальних рівнянь у переміщеннях, що описує напружений стан розглядуваних циліндрів, при цьому розкрито невизначеність деяких складових цієї системи в геометрично особливій точці ($r=0$). Для розв'язання задачі застосовується чисельно-аналітичний підхід, що базується на методі відокремлення змінних на основі сплайн-функцій та стійкому чисельному методі дискретної ортогоналізації. Внутрішній шар циліндрів ізотропний, виготовлений з нержавіючої сталі ($E = 170 \text{ ГПа}$, $\nu_1 = 0,29$); зовнішній шар – ізотропний, виготовлений з оксиду алюмінію ($E_3 = 380 \text{ ГПа}$, $\nu_3 = 0,25$); для середнього шару обрано матеріал, модуль пружності якого, має квадратичну залежність від радіальної координати $E_2(r) = ar^2 + br + c$, при цьому коефіцієнт Пуассона дорівнює середньому арифметичному значенню коефіцієнтів сусідніх шарів $\nu_2 = 0,27$.

Задачу розв'язано за таких вихідних умов: радіус циліндра $R = 6l_0$, його довжина $l = 6l_0$; товщина шарів: внутрішнього $h_1 = l_0$, середнього $h_2 = 2l_0$ та зовнішнього $h_3 = 3l_0$; сталі закону зміни модуля пружності в залежності від товщини цього шару, дорівнюють: $a = 20$; $b = 10$; $c = 170$ для товщини $h_2 = 5$; $b = 15$; $c = 180$ для товщини $h_2 = 4l_0$.

Результати розв'язання задачі наведено на рис. 1, рис. 2 у вигляді графіків розподілу полів радіальних та колових напружень вздовж радіальної координати циліндрів для товщини середнього шару $h_2 = 2l_0$ на рис. 1 а, рис. 2 а, та для товщини $h_2 = 4l_0$ - на рис. 1 б, рис. 2 б. Суцільні криві відповідають шарнірному закріпленню торців, штрихові – жорсткому.



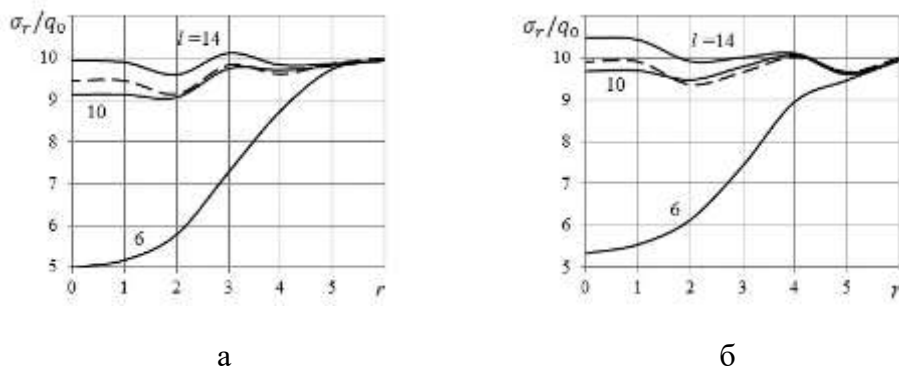


Рисунок 1 – Розподіл полів радіальних напружень за радіальною координатою

За жорсткого закріплення торців, розподіл полів радіальних та колових напружень не залежить від довжини циліндрів, при цьому має місце вплив товщини середнього шару. Максимальна величина колових напружень має місце на зовнішній границі середнього шару і за його меншої товщини (рис. 2 а) збільшується приблизно в 1,3 рази, порівняно з величиною на осі циліндра та на 14%, порівняно з величиною на зовнішній поверхні. Для більшої товщини середнього шару (рис. 2 б), колові напруження розподіляються більш плавно і зростають по відношенню до їх значень на осі циліндра приблизно в 1,2 рази і практично не змінюються, наближаючись до зовнішньої поверхні.

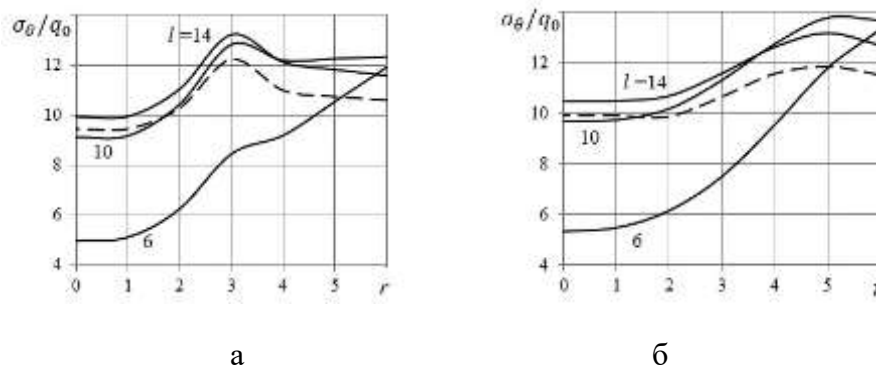


Рисунок 2 – Розподіл полів колових напружень за радіальною координатою

У випадку шарнірного закріплення торців спостерігається вплив довжини циліндрів як на радіальні, так і на колові напруження, особливо на осі циліндра. Так, для циліндрів довжиною $l = 10 l_0$; $14 l_0$ величина напружень зростає майже удвічі, порівняно з циліндрами довжина яких $l = 6 l_0$. Збільшення товщини середнього шару призводить до більш плавного розподілу величини колових напружень вздовж радіальної координати. Крім того, як видно з рис.1, рис. 2, спосіб закріплення торців більшою мірою впливає на величину радіальних та колових напружень для коротших циліндрів ($l = 6 l_0$).



Висновки. На основі методу сплайн-апроксимації функцій в поєднанні з чисельним методом дискретної ортогоналізації, розв'язано задачу та проведено аналіз характеристик напруженого стану суцільних тришарових циліндрів різної довжини з неперервнонеоднорідним заповнювачем за рівномірного стиску бічної поверхні та двох граничних умов на торцях. Отримані в роботі результати можуть бути використані при прогнозуванні поведінки конструктивних елементів подібного виду та як фундаментальні дослідження механіки деформівного твердого тіла.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mendil, F., Bechir, H., & Methia, M. (2024). Effect of nonhomogeneity on compression of solid circular cylinders made of functionally graded incompressible neo-Hookean materials. *Meccanica*, (59), 1625–1638.
2. Токова, Л.П., & Ясінський, А.В. (2013). Напружений стан багатошарового неоднорідного циліндра за рівномірного стиску бічної поверхні. *Прикл. пробл. мех. і мат.* (11), 101–107.
3. Grigorenko, Ya.M., Grigorenko, A.Ya., & Rozhok, L.S. (2006). Solving the stress problem for solid cylinders with different end conditions. *Int. Appl. Mech.* 42 (6), 629–635.



Лаухін Дмитро¹, Довгаль Денис²

¹професор, доктор технічних наук, професор, НТУ «Дніпровська політехніка»,
Дніпро, Україна, e-mail: laukhin.d.v@ntu.one

²доцент, кандидат технічних наук, доцент, НТУ «Дніпровська політехніка»,
Дніпро, Україна, e-mail: dovhal.d.o@ntu.one

МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОГРАННИКІВ КРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СИМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ЗАСОБАМИ CAD- СИСТЕМ

Анотація. Запропоновано принципів підхід до побудови поверхонь одиничних кристалів кристалічної решітки матеріалів, заснований на симетричних перетвореннях кінематичних багатогранників кубічної та гексагональної сингоній за допомогою базових інструментів 3D-моделювання CAD-систем.

Ключові слова: кристал, кристалічна решітка, вісь симетрії, багатогранник, сингонія, булева операція, CAD-система, 3D-модель

Вступ. У сучасному матеріалознавстві, зокрема, у кристалографії глибоко вивчають і досліджують кристалічні решітки, їх структури та взаємне розташування окремих кристалів різних матеріалів. У вивченні всіх цих питань окрему і важливу роль відіграє геометричне і комп'ютерне моделювання як кристалічних структур матеріалів так і безпосередньо форм самих кристалів.

Оскільки існує залежність між зовнішньою формою, властивостями кристалів і їхнім складом [1], створення адекватних геометричних і комп'ютерних 3D-моделей форм кристалів вкрай необхідно для подальших досліджень. Мета цих досліджень полягає у створенні нових сучасних матеріалів та поліпшені властивостей існуючих, зокрема і спеціальних.

Приблизні геометричні форми кристалів більшості матеріалів відомі та досліджувалися багатьма авторами [2]. Але усі дослідження виконувалися виходячи із достатньо спрощеної форми кристалів або з кристалами, форми яких розглядають як прості багатогранники. При цьому ступінь адекватності моделей, які засновані на зазначеному спрощенні, не завжди дають вірогідний результат.

Сучасний рівень розвитку комп'ютерних технологій та потужні прикладні пакети програмного забезпечення дають змогу різко збільшити вірогідність і точність моделювання кристалів і кристалічних структур матеріалів у просторі.



Матеріал і результати досліджень. Метою даної роботи є розробка принципового підходу до побудови багатогранних поверхонь одиничних кристалів різної складності на основі симетричних перетворень призм середньої категорії (кінематичних багатогранників) типовими інструментами CAD-систем.

У тривимірному моделюванні складних багатогранних поверхонь, якими є кристали, виникає проблема їх побудови за допомогою базових формують (булевих, кінематичних) операцій, оскільки більшість таких поверхонь не є кінематичними.

Форма багатогранника визначається кількістю усіх сортів граней, їх взаємним розташуванням і співвідношенням розмірів граней різного сорту [3]. Гранні поверхні нижчої і середньої категорії (моноедри, діедри, призматичні, пірамідальні, діпірамідальні поверхні, ромбоедри, скаленоїдри тощо) можливо легко побудувати за допомогою булевих операцій. Що ж стосується побудови гранних поверхонь вищої категорії (тетраедри, октаедри, гексаедри, додекаедри тощо), які наближено являють собою форму кристалів, наприклад, таких матеріалів як галіт, пірит, золото, флюїт, хроміт, алмаз тощо, то з точки зору геометричного і комп'ютерного моделювання – це досить складне завдання [4]. І типового алгоритму щодо побудови таких поверхонь засобами CAD-систем немає.

Запропонований підхід до побудови складних гранних поверхонь наявними засобами CAD-систем заснований на симетричних перетвореннях та бульовому формоутворенні на базі кінематичних багатогранників гексагональної і кубічної сингонії. Сутність даного підходу полягає у тому, що зазначені базові гранні поверхні легко утворюються стандартними формують операціями та містять крім простих осей симетрії – інверсійні осі різних порядків. Ці властивості кінематичних багатогранників гексагональної і кубічної сингоній дають змогу з даних простих у побудові гранних поверхонь отримувати практично будь які базові форми багатогранників (відомо 25 середньої і 15 вищої категорії) а також їх комбінації, яких можливо утворити нескінченну кількість.

На рис. 1, а наведено систему внутрішніх (глобальних) і зовнішніх (локальних) осей симетрії, базових площин і точок гексаедра (куба), за допомогою яких базовими булевими операціями побудовані 3D-моделі - приклади багатогранників кубічної сингонії – октаедр (рис. 1, б), ромбічний додекаедр (рис. 1, в).

На рис. 2, а наведено систему внутрішніх (глобальних) і зовнішніх (локальних) осей симетрії, базових площин і точок гексагональної призми, за допомогою яких базовими булевими операціями побудовані 3D-моделі - приклади багатогранників гексагональної



сингонії – гексагональна діпіраміда (рис. 2, б), симетричний комбінований багатогранник з гранями двох сортів (рис. 2, в).

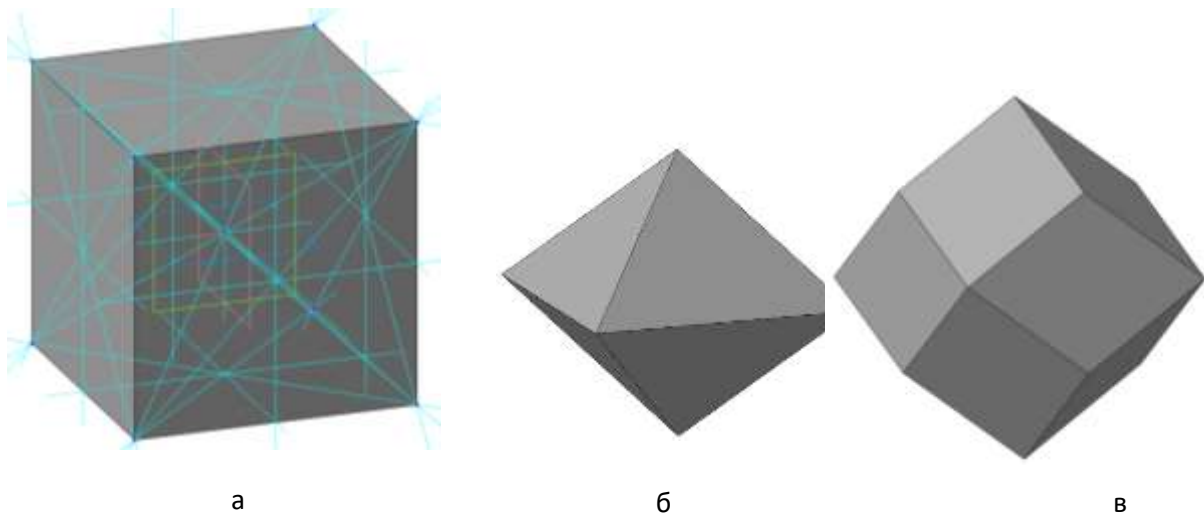


Рисунок 1 – Приклади побудови багатогранників кристалів кубічної сингонії

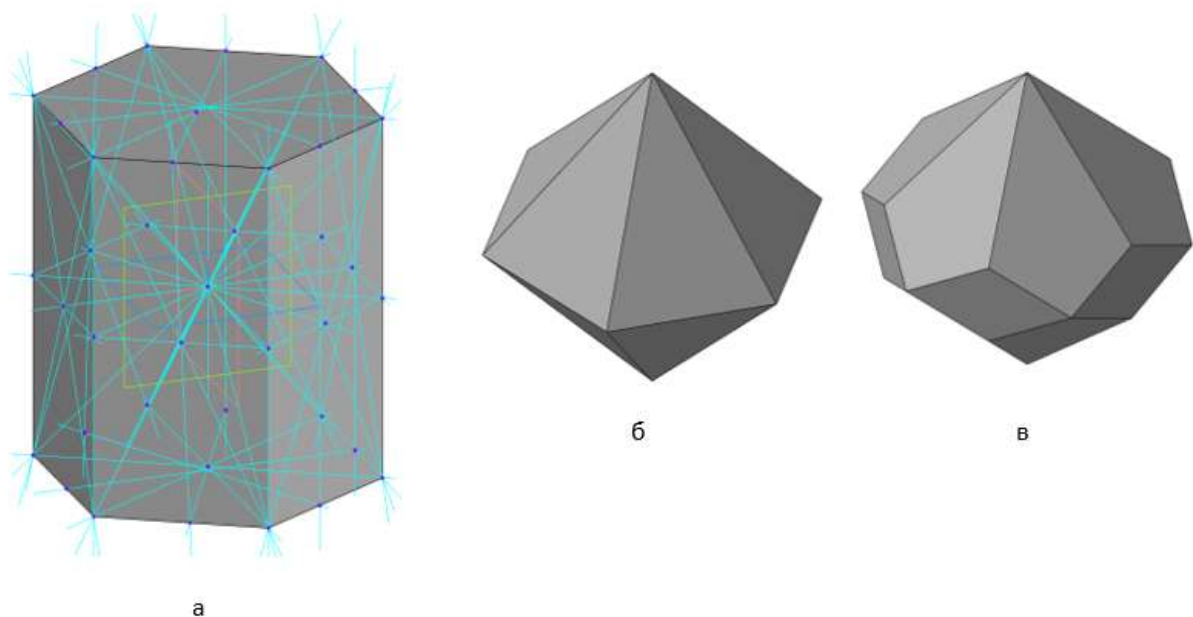


Рисунок 2 – Приклади побудови багатогранників кристалів гексагональної сингонії

Висновки. Запропонований принциповий підхід до побудови поверхонь одиничних кристалів кристалічної решітки матеріалів, дає змогу з на базі простих кінематичних багатогранників кубічної та гексагональної сингоній із застосуванням системи внутрішніх і зовнішніх осей симетрії, базових та допоміжних (побудованих на основі осей симетрії) площин і точок за допомогою базових булевих операцій CAD-систем

отримувати 3D-моделі багатогранників практично будь-якої складності. Використання запропонованого підходу може суттєво допомогти у моделюванні дослідженні форми кристалічної решітки матеріалів та агломерацій кристалів матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кривуша, Л., & Большаков, В. (2002). Кристалографія, кристалохімія і мінералогія. Gaudeamus. 223 с.
2. Allan, L. & Bell, R. (1997). Computer Modeling in Inorganic Crystallography. Academic Press. 348 p.
3. Бідніченко, О. (2022). Особливості геометричних поверхонь та способи їх комп'ютерного моделювання. Прикладна геометрія та інженерна графіка, (102), 13-26.
4. Ванін, В., & Вірченко, Г., Яблонський, П., Незенко, А. (2020) Деякі актуальні задачі сучасного комп'ютерного геометричного моделювання технічних об'єктів. Прикладна геометрія та інженерна графіка (97), 16–22.



Володимир Лобода¹, Віктор Адлущкий², Роман Воєділо³

¹зав. кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки, д.ф.-м.н., професор,
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна, e-mail:
loboda@dnu.dp.ua

²с.н.с. НДЛ механіки руйнування та пластичного деформування матеріалів, к.ф.-
м.н., с.н.с., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро,
Україна, e-mail: adluckiiv kkt@dnu.dp.ua

³аспірант кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки, Дніпровський
національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна, e-mail:
roman.voyedilo@gmail.com

СКІНЧЕННОЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ РУЙНУВАННЯ ЧАСТКОВО ЕЛЕКТРОДОВАНОЇ ТРІЩИНИ В П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОМУ МАТЕРІАЛІ

Анотація. Розглядається плоскодеформований стан частково електродованої тріщини в п'єзоелектричному матеріалі. Електродована зона симетрично розташована на обох берегах тріщини. Допускається утворення зон механічного контакту між берегами тріщини. Проведено аналіз впливу на параметри руйнування таких факторів, як довжина електродованої зони, напрямок електричного поля й напрямок поляризації п'єзоматеріалу.

Ключові слова: п'єзоелектричний матеріал, частково електродована тріщина, метод скінченних елементів, параметри руйнування, інтегральний метод віртуального закриття тріщини.

П'єзоелектричні матеріали широко використовуються в сучасних мікроелектронних виробках, які часто є елементами конструкцій спеціального призначення. В процесі експлуатації вони зазвичай піддаються значним навантаженням як механічній, так і електричній природи. Відомо [1], що п'єзо-електричні матеріали схильні до крихкого руйнування, тому дослідження їх електромеханічної поведінки та руйнування мають велике практичне значення. Часто виникає необхідність оцінки можливості подальшого руйнування внаслідок утворення на берегах тріщини зон з різними електричними властивостями, як це, наприклад, має місце при відшаруванні електроду від п'єзоматеріалу, або при розшаруванні самого електроду. На відміну від



випадків антиплоского механічного навантаження, аналітичні розв'язки подібних плоских задач невідомі. Метою даної роботи є дослідження плоскодеформованого стану частково електродованої і частково ізолюваної тріщини в однорідному п'єзоелектричному матеріалі методом скінченних елементів з метою оцінки впливу на параметри руйнування таких факторів, як довжина електродованої зони, напрямок електричного поля й напрямок поляризації п'єзоматеріалу.

Розглядається плоска деформація нескінченної площини x_1x_3 , заповненої однорідним п'єзоматеріалом, вісь поляризації якого лежить в цій площині й утворює кут α з віссю x_1 . На відрізку $AB: x_1 \in (-l, l), x_3 = 0$ розташована тріщина, зона електродування якої має довжину d (рис. 1).

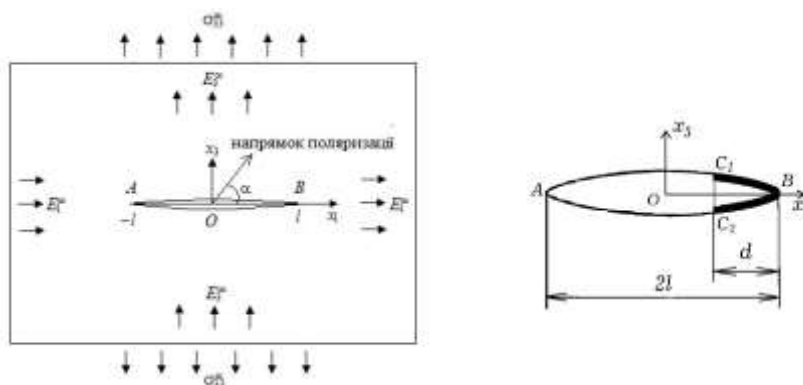


Рисунок 1 – П'єзоелектричний матеріал з частково електродованою тріщиною

Замкнена система рівнянь п'єзостатики за відсутності масових сил і вільних зарядів описується рівняннями [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,i} = 0; \quad D_{i,i} = 0; \quad \sigma_{ij} = c_{ijkl}\varepsilon_{kl} - e_{kij}E_k; \quad D_i = e_{ikl}\varepsilon_{kl} + \chi_{ik}E_k; \\ D_i = e_{ikl}\varepsilon_{kl} + \chi_{ik}E_k; \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}); \quad E_i = -\varphi_{,i}; \quad i, j, k, l = \overline{1,3}, \end{aligned}$$

де u_i – компоненти вектора переміщень $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – компоненти тензорів напружень та деформацій; E_i, D_i – компоненти векторів електричного поля та електричної індукції; $c_{ijkl}, e_{ijk}, \chi_{ij}$ – компоненти пружної, п'єзоелектричної та діелектричної матриць. Електрична гранична умова в електродованій зоні C_1BC_2 має вигляд $\varphi(x_i, 0) = 0$.

На решті тріщини виконується гранична умова ізолюваності $D_3(x_1, 0) = 0$. На нескінченності задані компоненти електромеханічних полів $\sigma_{33}^\infty, E_1^\infty, E_3^\infty$.



За результатами розв'язання крайової задачі розшукуються такі параметри руйнування, як розкриття тріщини $\Delta(x_1) = u_3^+(x_1, 0) - u_3^-(x_1, 0)$ та швидкості вивільнення енергії (ШВЕ) $G(A)$ і $G(B)$ у вершинах тріщини A і B . Обчислення ШВЕ здійснюється за допомогою інтегрального методу віртуального закриття тріщини [2]. Наприклад, ШВЕ в вершині B представляється сумою механічної і електричної компонент $G^M(B)$ і $G^E(B)$:

$$G_I^M(B) = \frac{1}{2\delta} \int_0^\delta \sigma_{33}(s) \Delta u_3(s-\delta) ds; \quad G_{II}^M(B) = \frac{1}{2\delta} \int_0^\delta \sigma_{13}(s) \Delta u_1(s-\delta) ds; \quad G^M(B) = G_I^M(B) + G_{II}^M(B);$$

$$G^E(B) = \frac{1}{2\delta} \int_0^\delta [D_3(s) \Delta \varphi(s-\delta) - D_3^+(s-\delta) \varphi^+(s-\delta) + D_3^-(s-\delta) \varphi^-(s-\delta) - \Delta D_3(s-\delta) \varphi(s)] ds;$$

$$\Delta u_i(s) = u_i^+(s) - u_i^-(s), \quad i=1,3; \quad \Delta \varphi(s) = \varphi^+(s) - \varphi^-(s); \quad \Delta D_3(s) = D_3^+(s) - D_3^-(s),$$

де δ – довжина ділянки віртуального закриття тріщини. Позначка ”+“ відноситься до верхнього берега тріщини, а ”-“ – до нижнього.

На рис. 2 та в табл.1 наведено деякі з отриманих скінченноелементних результатів.

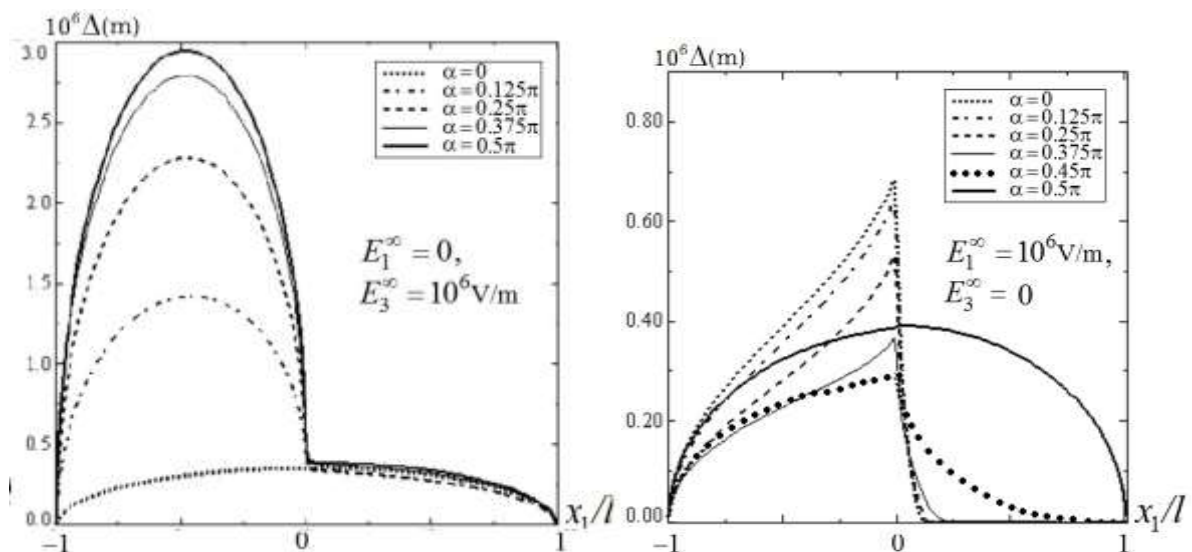


Рисунок 2 – Розкриття Δ тріщини, електродованої на проміжку $d=l$, при $\sigma_{33}^0 = 10^6 \text{ Pa}$ та різних значеннях кута α і напрямку електричного поля (п'єзоматеріал PZT-5H)



Таблиця 1 – Компоненти ШВЕ для тріщини, електродованої на проміжку $d=1$ $\sigma_{33}^0 = 10^6 \text{ Pa}$ та різних значеннях кута α (п'єзоматеріал PZT-5H)

α / π	$E_1^\infty = 0, E_3^\infty = 10^6 \text{ V/m}$				$E_1^\infty = 10^6 \text{ V/m}, E_3^\infty = 0$			
	$G^M(A)$ (N/m)	$G^E(A)$ (N/m)	$G^M(B)$ (N/m)	$G^E(B)$ (N/m)	$G^M(A)$ (N/m)	$G^E(A)$ (N/m)	$G^M(B)$ (N/m)	$G^E(B)$ (N/m)
0	0.27	-193.7	0.29	-0.01	0.32	0.58	-0.11	234.7
0.25	2.47	-173.2	0.25	0.26	0.30	0.45	-1.15	243.2
0.5	3.25	-152.7	0.31	0.00	0.58	0.37	-1.88	250.1

Аналіз отриманих розрахункових даних показує, що наявність електродованої зони тріщини спричиняє значний вплив на її деформування, внаслідок чого виникають деформовані конфігурації, які не спостерігаються при однорідних електричних граничних умовах. Типовим є утворення контактних зон на берегах тріщини, а також її вигинання. Найбільш небезпечною з точки зору руйнування виявляється ситуація, коли напрямок електричного поля співпадає з напрямком поляризації п'єзоматеріалу, а тріщина орієнтована перпендикулярно до них. За таких умов спостерігаються максимальні значення як розкриття тріщини, так і механічних компонент ШВЕ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fang, D., & Liu, J. (2013). Fracture mechanics of piezoelectric and ferroelectric solids. Tsinghua University Press, Beijing.
2. Adlucky, V. J., Levchenko, M. S., & Loboda, V. V. (2024). Finite-element analysis of the parameters of fracture in a piezoelectric bimaterial with interface crack for various types of boundary conditions on its faces. Journal of Mathematical Sciences, 279(2), 1–16.



Olexander Dolgov¹, Mariia Chaika²

¹Professor, Ph.D. Eng., Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Dolgov@nmu.one

²Trainee, Bachelor, Hochschule Esslingen, Germany, e-mail: ChaiikaM.K.@nmu.one

MODELING AND ASSESMENT OF THE SPORTS EXOPROSTHESES LOAD-BEARING CAPACITY

Abstract. The purpose of the study is to analyze the structural strength of sports exoprostheses of the foot. The stress and strained state analysis of a prosthesis model made of different materials was carried out. The results can be used to improve the designs of sports exoprostheses and increase their strength and reliability.

Keywords: foot exoprosthesis, modeling, stress, stiffness, structural strength.

Introduction. Ensuring the strength and stiffness of special-purpose structures, including biotechnical and medical products, is one of the key problems of mechanical engineering. At the present stage, the problem of prosthetics, in particular sports prosthetics of the foot is becoming increasingly relevant. World statistics indicate an annual increase in the number of limb amputations [1].

The growth of demand for sports foot prostheses is associated with the desire of people with amputees to lead an active lifestyle and engage in sports. This is due to the constant improvement of prostheses, which are becoming more and more functional [2]. Optimization of sports prosthetic designs should improve the quality of life of patients with amputees [3]. The growing popularity of inclusive sports, the constant development of new technologies in the field of prosthetics, and the strengthening of state support for this area make research relevant.

This determines the importance of applied research for solving current problems of prosthetics [4].

Content and research results. The optimal solution that provides high accuracy, efficiency, and reliability of the results of assessing the structural strength of prosthetic foot is the finite element method, which allows creating prostheses of the highest quality standards. Autodesk Inventor software was used to create and analyze the 3D-model [5].



The prosthesis model is considered to be completely fixed at the point of attachment to the lower leg. The boundary conditions of the ground contact surface limit the movement and rotation of the model mesh nodes.

The stress-strain state analysis of the prosthesis was carried out for four prosthesis material options: titanium alloy Ti-6Al-4V, high- and medium-modulus carbon fiber, and high-strength composite with P-100 fiber and epoxy matrix. A wide range of external loads was considered: 500 ÷ 3750 N.

The mechanical properties of the composites were calculated using a micromodel of unidirectional composite materials according to the rule of mixture [6].

The distribution of stresses and displacements for an external load of 3750 N in the model of high-strength carbon fiber prosthesis is shown in Fig. 1.

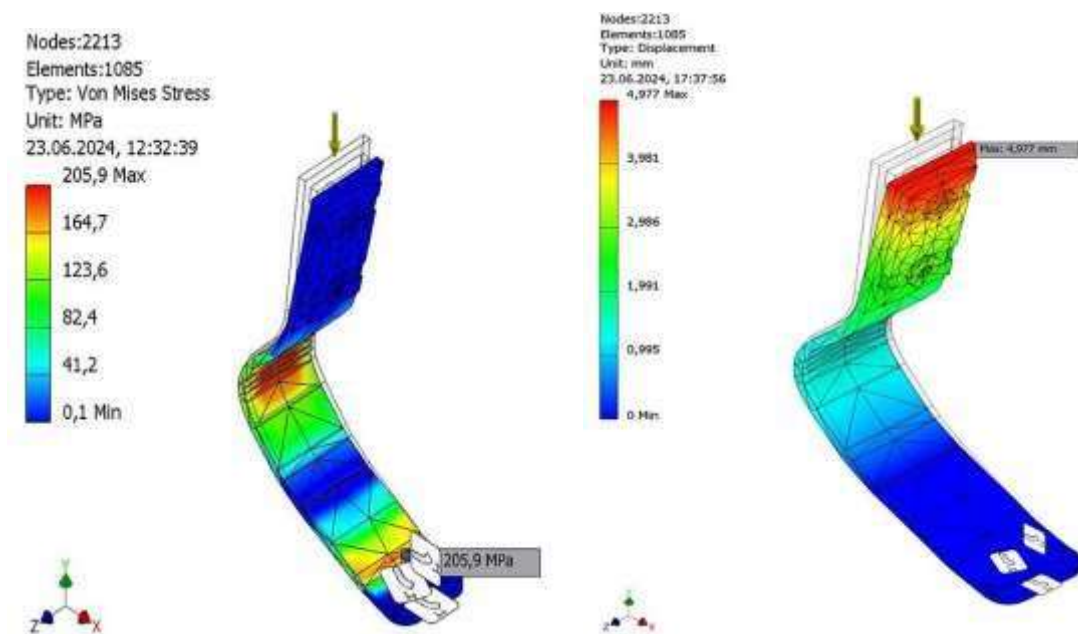


Figure 1 - Stresses and displacements in a carbon fiber prosthesis model under a load of 3750 N (fiber – carbon IM7, matrix – epoxy resin)

Similar calculations were performed for models made of the materials mentioned above. In all cases, the maximum stresses are concentrated in the heel and the bending zone.

Analysis of the results obtained gives grounds to state the following:

- carbon fiber with IM7 fibers compared to the studied materials has the highest strength, which makes it an excellent choice for lightweight and high-strength prostheses; it has medium density and high wear resistance;



- prostheses with P-100 carbon fiber have the highest stiffness, but relatively high density, which increases their weight;
- prostheses made of titanium alloy Ti-6Al-4V have high strength and flexibility, but the highest density among the considered materials;
- models made of medium modulus composite have the lowest strength, which may be a limitation at high dynamic loads, moderate stiffness, while having low density and high fatigue resistance.

Conclusions.

1. IM7 carbon fiber models are the best choice for creating sports foot prostheses due to their high strength, stiffness and relatively low density. They are excellent for sports where speed, maneuverability and lightness are important, such as sprinting, jumping and cycling.
2. P-100 carbon fiber reinforced prostheses have the highest stiffness, which makes them ideal for sports where maximum stability and support are required, such as weightlifting or powerlifting. However, the relatively high density increases the weight of the prosthesis, which limits their application.
3. The polymer-carbon medium modulus composite provides a balance between stiffness and weight of the prosthesis. At the same time, its use is possible for people with relatively low weight and sports with moderate loads on the foot.
4. Models made of titanium alloy Ti-6Al-4V have high strength and flexibility, excellent corrosion resistance, which makes them ideal for use in conditions where the prosthesis is exposed to significant loads and high humidity, such as triathlon or swimming. However, their use is limited in some cases by their relatively high weight.

REFERENCES

1. Standards for Prosthetics and Orthotics. World Health Organization. (2017). <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/259209/9789241512480-part2-eng.pdf?sequence=2>.
2. Ikeda AJ, Grabowski AM, Lindsley A, Sadeghi-Demneh E, Reisinger KD. (2014)/ A scoping literature review of the provision of orthoses and prostheses in resource-limited environments 2000-2010. Part two: Research and outcomes. Prosthet Orthot Int. 2014; 38(5):343-62. <http://doi.org/cv59>.
3. Протезно-ортопедичний комплекс. РКРОР. (2018). <https://www.ispoint.org>.



4. Cochrane H, Orsi K, Reilly P. (2001). Lower limb amputation Part 3: Prosthetics - a 10 year literature review. Prosthet Orthot Int. 2001; 25(1):21-8. <http://doi.org/fw7cnn>.
5. Ковальов Ю. М., Калініченко В. В. (2018). Навчально-методичний комплекс дисципліни «Основи тривимірного комп'ютерного моделювання» : Навч. посібник / Ю. М.
6. Ковальов, В. В. Калініченко – Київ, 2018. – 205 с.
7. Daniel, Isaac M. (2006). Engineering mechanics of composite materials /Isaac M.
Daniel, Ori Ishai.-2nd ed. New York – Oxford.Oxford University Press. 412 p.



Oborskyi Gennadii¹, Hutyria Serhii², Yahlinskyi Viktor³, Khamrai Vadim⁴

Rector, Dr of Tech. Sc., Professor, Odessa Politechnic National University

oborsky@op.edu.ua

Director of Institute, Dr of Tech. Sc., Professor, Odessa Politechnic National University

hutyria@op.edu.ua

Dr of Tech. Sc., Professor, Odessa Politechnic National University

v.p.yaglinskiy@op.edu.ua

Senior lecturer, Master, Odessa Politechnic National University

v.k.khamrai@op.edu.ua Odessa, Ukraine

KINEMATICS, VIBRATION ACTIVITY AND RELIABILITY OF THE HEXAPOD TYPE DYNAMIC PLATFORM AS PART OF TRAINING EQUIPMENT

Annotation. The possibilities of improving the technical level of the 6 DoF dynamic platform of the hexapod type in terms of the working space, kinematics, vibration activity and reliability were investigated. The feasibility of adding two degrees of platform mobility to the auto-simulator, as well as the use of a passive damping system to limit the vibration activity of the platform under acceleration and shock loading conditions, was substantiated.

Keywords: dynamic platform, hexapod, kinematics, vibration activity, reliability, shock absorber

Material and research results. Today, the safest and most practically tested is the training and certification of driver mechanics on simulators that include a hexapod type of the 6 DoF dynamic platform (Fig. 1). The cost of such training equipment exceeds \$ 1 million. A more complete imitation of the maneuvering conditions of heavy military equipment is provided on specialized simulators by expanding the working space with additional mobility of the 8 DoF platform, equipped with a system of powerful hydraulic and/or electro-mechanical adjustable drives. The cost of similar equipment exceeds \$ 2 million, their downtime due to insufficient reliability of hinges, drives, automatics is critical for the customer. The urgent tasks of designing such unique and expensive systems is to minimize the vibration activity of the platform under conditions of acceleration and impact loading. The 6 DoF dynamic platform has a moving platform 1, fixed base 2 and six moving links of variable length 3, which are connected by fixed A and moving B hinges (Fig. 2) [1, 2].



To meet the set of specified requirements, the design of the driving simulator has a significantly expanded working space, which ensures the movements of the 8 DoF platform (Fig. 3) in the following ranges: vertical up to ± 200 mm; longitudinal and transverse up to ± 4000 mm; roll and pitch angles up to ± 35 degrees; rotation around the vertical axis up to ± 35 degrees. Speeds, accelerations and jerks depend on the drive type.

The electromechanical two-coordinate adjustable drive ensures speed, acceleration and jerk values of up to 1.2 m/s; 5 m/s²; 250 m/s³, respectively [3, 4].

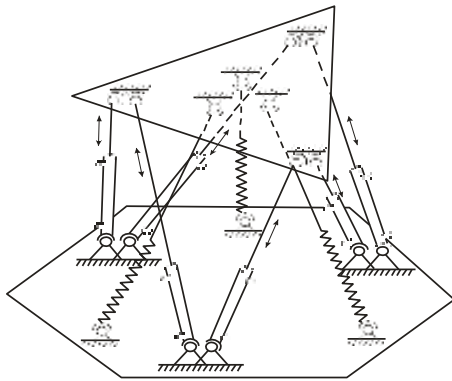


Fig. 1 Structural scheme of the 6 I dynamic platform with damper subsystem

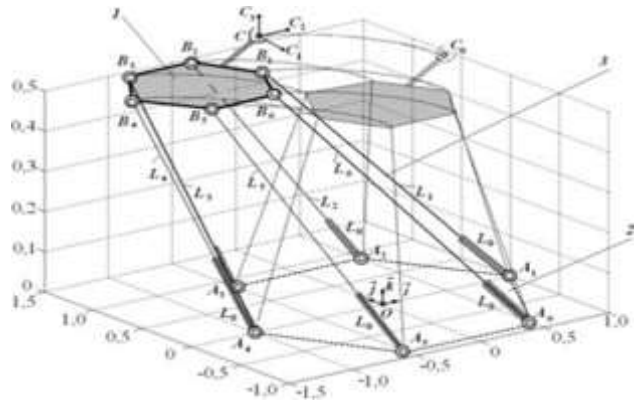


Fig. 2 Simulation of the hexapod type dynamic platform maneuvering

The use of a hydraulic drive makes it possible to increase the specified values to 10 m/s; 30 m/s²; 500 m/s³. Control of the length of the six hexapod rods provides limit values of angular velocity of 1.2 s⁻¹, acceleration of 15 s⁻², and jerk of 350 s⁻³ [5].

The base 1 of the dynamic platform of the hexapod type is placed on the movable base with the center at point *S* (Fig. 3). Two pairs of rolling supports additionally provide the possibility of free movement of the base 1 along the coordinate guides 2 and together with them along the guides 3. In general, the training system has 8 degrees of mobility. On the platform 4 of the hexapod at pole *P*, the training cabin is located. The base and the platform are connected to each other by means of spherical hinges and six rods 6 of variable length. To implement the translational movements of the base 1, linear, widely adjustable electric drives are used [6, 7].



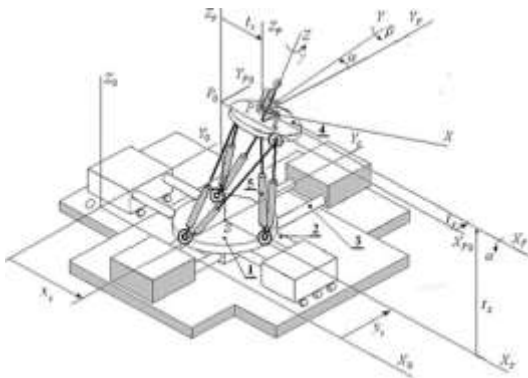


Fig. 3 Calculation scheme of the kinematics of the 8 DoF platform: 1 – base; 2, 3 – guides;
4, 5 – platform and hexapod rods

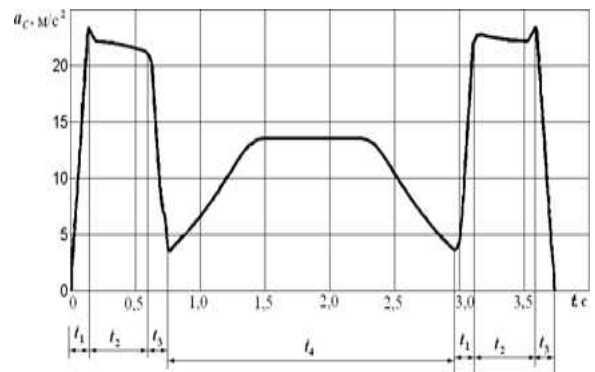


Fig. 4 Function of acceleration impact on the 8 DoF platform when performing a maneuver of the “pitch” with an angle of up to 30°

For the linear motors of the hexapod base, a positional control system is preferable, which is characterized by subordination to the final goal - the movement of the object from the initial position to the specified position. In this case, the order of processing the task by individual links and the trajectories of their movement can be arbitrary or correspond to the selected optimization strategy. Reproduction of various kinematic diagrams is based on the use of analytical dependencies and the numerical integration method (NI) of a high-order derivative. It has been established that when simulating a steep descent with a “pitch” angle of 30° on a simulator, the driver and platform experience acceleration effects in the range of 4...23 m/s², which is confirmed by accelerometer readings and helps to develop driving skills in extreme conditions [2, 5, 8].

The increase in the technical level of hexapod is justified by the use of a damping device based on modern serial designs of shock absorbers, which are widely used in transport engineering [9, 10, 11]. The least material-intensive and most compact with the same instantaneous power are modern designs of hydropneumatic shock absorbers (HPSA), which provide the ability to adjust operating characteristics and stability in a wide range of oscillation frequencies. Vibro-shock working processes in HPSA are characterized by two sections: the compression stage, corresponding to the passage of fluid through calibrated holes; the extension stage, corresponding to the operation of forward and reverse relief valves. The limiting values of the speeds of the section-linear intervals, the drag force coefficients at the compression and rebound stages, as well as the maximum values of the drag forces have been determined (Fig. 5, 6).



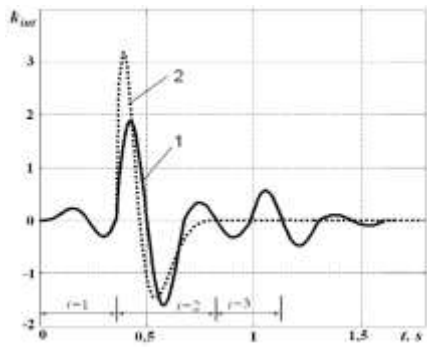


Fig. 5 Diagrams of criterion of absorption in the HPSA: curve 1 – for “Sachs Touring”;
2 – for “Plaza Sport”

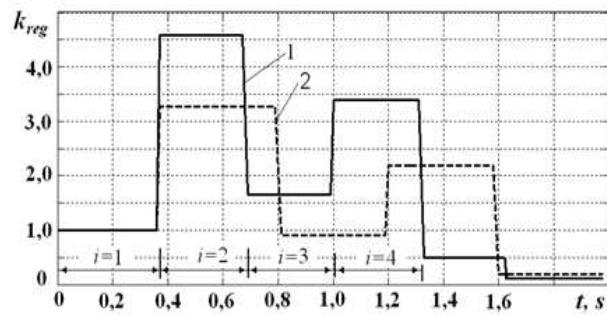


Fig. 6 Diagrams of change of the criterion of damping properties of the HPSA “Sachs Touring”:
curve 1– at normal oil volume; 2 – at loss of 40 % of oil

Conclusions

1. An analytical method and a numerical algorithm for calculating the kinematic characteristics of the hexapod base motion under known speed, acceleration and jerk limitations for widely adjustable linear electric motors with forced load capacity have been developed.
2. Using the example of reproducing a pitch maneuver by a dynamic platform of the 8 DoF type, a simulation of the acceleration effect on the driver up to the level of 23 m/s² has been performed, which verificate such training equipment for simulating standard maneuvering of heavy military technic.
3. As criterion indicators of the damper system's operability, the following are proposed: overload coefficient, duration of the full recovery stage, asymmetry coefficient of the force characteristic and nonlinearity coefficient of the force characteristic at the compression stage.
4. The damper system model is displayed assuming the shape of the impact force as a half-wave of a sine wave. Using the fitting method, a solution of nonlinear differential dependencies is obtained. The Pareto-optimal set of values of criterion coefficients of the technical level of hexapod damper subsystem is formed.



REFERENCES

1. Gutryra, S. & Yaglinский, V. (2010). Mechanisms of parallel structures in the modern engineering industry. *Technol. Compl.*, 2, 25-35.
<https://scholar.google.com/scholar?cluster=8415875161329479101&hl=en&oi=scholar>
2. Оборський, Г., Гутиря, С., & Яглінський, В. (2011). Надійність верстатів-роботів і промислових платформ на основі механізмів паралельної структури. *Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. Зб. наук. праць ДНУ*, 12, 246-254.
<https://scholar.google.com/scholar?cluster=13652691744881622169&hl=en&oi=scholar>
3. Гутиря, С., Яглінський, В., & Обайді, А. (2012). Підвищення технічного рівня механізмів паралельної структури і кінематики у складі технологічних комплексів. *Технологічні комплекси*, 2, 2 (5,6), 50-56.
<https://scholar.google.com/scholar?cluster=11129454913268802204&hl=en&oi=scholar>
4. Яглінський, В., Обайді, А., & Фелько Н. (2014). Increasing the Mobility of Cabins of Dynamic Simulators of Mobile Machines. *Technology Audit and Production Reserves*, 3,4 (17), 44-48.
DOI: 10.15587/2312-8372.2014.25333
5. Яглінський, В., & Гутиря, С. (2011) Надійність авіаційного тренажера на основі гексапода при екстремальних навантаженнях. *Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія Механіка, енергетика, екологія*, 120, 196-205.
<https://scholar.google.com/scholar?cluster=12049141312457191838&hl=en&oi=scholar>
6. Яглинский В., Гутыря, С., Ал-Обайди, А., Фелько, Н., & Беликов, В. (2014), Моделирование акселерационного воздействия на экипажи мобильных машин. *Technological complexes*, 2(10), 99-107. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tehkom_2014_2_16
7. Яглінський, В., & Обайді, А. (2014). Kinematics of a combined modular dynamic simulator. *Technology Audit and Production Reserves*, 2, 1(16), 38-41. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.23435>
8. Яглінський, В., Гутиря, С. & Аніченко, А. (2023). Орієнтація руху платформи гексаподу за додатковими векторами. *Забезпечення якості технологічних процесів та систем, КЗЯТПС*, 205-206. <http://ir.stu.cn.ua/123456789/27918>
9. Glovyn, N., Gliva, O., Тихонова, О., ... Hutyria, S., Yahlinskyi, V.,... & Вінюков, А. (2024). Technical, agricultural and physical sciences as the main sciences of human



development. International Science Group. Technical, agricultural and physical sciences as the main sciences of human development - International Science Group

10. Gutyrva, S., Yaglinitskiy, V., & Gaydamaka, A. (2016). System Model of a Technical Level of Rolling Bearings. *British Journal of Applied Science & Technology*, 13(2), 1-9.
<https://scholar.google.com/scholar?cluster=14064833620740766149&hl=en&oi=scholar>

11. Сидоренко, І., & Гутирва, С. (2008). Вимушені коливання механічної системи з двома ділянками комбінованої пружної характеристики. *Вісник Східно-українського НУ імені Володимира Даля*, 2, (6), 77-83.
<https://scholar.google.com/scholar?cluster=17239112490639874060&hl=en&oi=scholar>



Марчук Михайло¹, Боднар Володимир², Пакош Віра³, Бабуров Володимир⁴

1 завідувач відділу, доктор фіз.-мат. наук, професор, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів, Україна, e-mail: mv_marchuk@ukr.net

2 аспірант, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів, Україна, e-mail: volodymyrbodnar.97@gmail.com

3 старший наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук, старший наук. співроб., Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів, Україна, e-mail: v.pakosh@ukr.net 4 начальник сектору, Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: literator11@i.ua

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФЛАТТЕРА ПОДАТЛИВИХ ДО ТРАНСВЕРСАЛЬНОГО ЗСУВУ ПЛАСТИН-СМУГ ТА ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЯ

Анотація. На основі варіанта уточненої теорії пластин отримана математична модель поведінки податливої до трансверсального зсуву пластини-смуги за дії аеродинамічного потоку. Запропонований метод її реалізації та наведені результати чисельного дослідження залежності критичної частоти від параметра трансверсального зсуву.

Ключові слова: пластина-смуга, трансверсальний зсув, аеродинамічний потік, математична модель, флаттер, критична частота.

Вступ. Сучасні тенденції до зниження матеріаломісткості поряд із забезпеченням необхідного рівня надійності відповідальних конструкцій різноманітного цільового призначення спричинили широкий запит на тонкостінні елементи з композитних матеріалів, зокрема армованих з полімерною матрицею. Основною відмінністю таких матеріалів від традиційних однорідних ізотропних є податливість до трансверсального зсуву.

Пластинчасті елементи є одними з важливих складників навантажених конструкцій в аерокосмічній галузі [7]. Їхня механічна поведінка за дії експлуатаційних, особливо динамічних, навантажень часто відіграє вирішальну роль у збереженні цілісності та функціональної придатності вказаних об'єктів. Зокрема це стосується випадку перебування елемента в аеродинамічному потоці газу. При певних швидкостях



потоків V та значеннях геометричних і фізико-механічних характеристик пластини в ній може виникнути процес самозбудження із наростаючою амплітудою коливань і привести до руйнування як пластини, так і цілої конструкції. Таке явище прийнято називати флаттером [2, 6]. Для пластин воно достатньо досліджено у випадку застосування класичних теорій [1], котрі не враховують специфіки деформування композитів.

Формулювання задачі. Розглянемо пластину-смугу товщини $2h$ в аеродинамічному потоці [2, 4]. Її динамічне деформування описуємо співвідношеннями варіанту уточненої теорії динаміки податливих до трансверсального зсуву пластин [5], що складають:

$$\text{а) рівняння руху: } M' - Q = \frac{2}{3} \rho h^3 \dot{\gamma}'; \quad Q' - 2\sigma_- = 2\rho h \ddot{w}; \quad (1)$$

$$\text{б) співвідношення пружності: } M = D \bar{e}_{11}^1; \quad Q = \Lambda \cdot 2e_{13}^0; \quad (2)$$

$$\text{в) деформаційні співвідношення: } \bar{e}_{11}^1 = \gamma'; \quad 2e_{13}^0 = \gamma + w', \quad (3)$$

де M і Q загальноприйняті позначення для згинального моменту та перерізувального зусилля; $\bar{e}_{11}^1 = e_{11}^1 / h = \gamma'$ і e_{13}^0 – відмінні від нуля для даного випадку компоненти тензора деформацій; w – вертикальне переміщення точок серединної площини; γ – кут повороту нормалі до серединної площини в недеформованому стані; $D = 2Eh^2 / 3(1-\nu^2)$; E, G, ν –

модулі Юнга та зсуву й коефіцієнт $k' = 14/15$ она; – коефіцієнт зсуву; ρ – густина матеріалу пластини, а $\sigma_{\pm 33}$ визначаємо з граничних умов на лицевих поверхнях $x_3 = \pm h$ [6]. Зокрема для σ – маємо $\sigma_- = -P_a / 2$, де P_a – зусилля, викликане аеродинамічним потоком, що має швидкість V [1, 6]. Для швидкостей, що менші від гіперзвукових [1, 6]

$$P_a = \frac{\rho_a V^2}{M_a} (w' + \frac{1}{V} \dot{w}), \quad M_a - \text{число Маха}; \quad \rho_a - \text{густина газу.}$$

Рівняння руху в узагальнених переміщеннях [4] мають вигляд

$$D\gamma'' - \Lambda(\gamma + w') = 0; \quad \Lambda(\gamma' + w'') - P_a = 2\rho h \ddot{w}. \quad (4)$$

За шарнірного опираю на нижніх ребрах видовжених граней пластини-смуги при $x = 0$ та $x = l$ граничні умови в узагальнених переміщеннях [3, 4] записуємо у вигляді

$$w(0, t) = 0; \quad \gamma'(0, t) = 0; \quad w(l, t) = 0; \quad \gamma'(l, t) = 0. \quad (5)$$

Внаслідок взаємопов'язаності функцій w та γ початкові умови мають вигляд

$$w(x, 0) = w(x); \quad (\gamma, 0) = (\gamma) \quad 1 \quad w \& x = w \quad x, \quad w \text{ та } w_1 - \text{відомі функції.} \quad (6)$$



Система рівнянь (4) з граничними (5) та початковими умовами (6) є математичною моделлю динамічного деформування податливої до трансверсального зсуву пластинисмуги за дії аеродинамічного навантаження P_a .

Розв'язувальне рівняння. Воно отримується із системи (4) шляхом нескладних перетворень і має вигляд

$$w^{IV} - \frac{2\rho h}{D} \ddot{w} - \frac{2\rho h}{\Lambda} \ddot{w}'' - \frac{M_a}{D} \left(\frac{D}{\Lambda} w''' + \frac{D}{V} \dot{w}'' - w' - \frac{1}{V} \dot{w} \right) = 0. \quad (7)$$

Задання аналітичного розв'язку рівняння (7) у вигляді [1]

$$w = W_1(x) e^{i\Omega t}$$

зводить його до звичайного диференціального рівняння

$$W_1^{IV} - a_1 W_1''' - a_2 W_1'' + a_3 \lambda W_1' + a_4 W_1 = 0, \quad (8)$$

$$\text{де } a_1 = \frac{2q}{M_a} \frac{l}{\Lambda}, \quad a_2 = \frac{l^2}{k'} C_3^{-2} \Omega^2 + \frac{2q}{M_a} \frac{l^2}{\Lambda V}; \quad a_3 = \frac{2q}{M_a} \frac{l^3}{D}; \quad a_4 = -\frac{l^4}{h^2} C_1^{-2} \Omega^2 + \frac{2q}{M_a} \frac{l^4}{D V}.$$

Відповідне характеристичне рівняння має вигляд

$$\lambda^4 - a_1 \lambda^3 - a_2 \lambda^2 + a_3 \lambda + a_4 = 0 \quad (9)$$

і на відміну від випадку застосування класичної теорії пластин є повним поліномом четвертого порядку, що суттєво ускладнює аналіз його розв'язків, $i = 1, 4$ лі, оскільки вони залежать від частоти Ω .

Метод реалізації моделі та висновки. Функцію W_1 шукаємо у вигляді

$$W(x) = (e^{i\lambda_1 x}, \dots, e^{i\lambda_4 x}) (C_1, \dots, C_4)^T = E \cdot C^T.$$

З крайових умов (5) отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь

$$B \cdot C = 0,$$

де b_{ij} – елементи матриці B розміру 4×4 , котрі визначаються через значення функцій

$e^{i\lambda_i x}$, $i = \overline{1, 4}$ та їх похідних при $x = 0$ та $x = 1$. З умови $\det B = 0$ маємо трансцендентне рівняння для спектру критичних частот Ω флаттера:

$$F(\Omega) = 0,$$

котре розв'язуємо чисельно методом локалізації коренів. Приведений чисельний розв'язок за конкретних фізико-механічних і геометричних характеристик матеріалу пластини-смуги дозволяє встановити характер залежності частоти флаттера від параметра податливості до трансверсального зсуву E/G' при заданих швидкостях V в діапазоні $[1M_a \div 5M_a]$ (трансзвуковий та гіперзвуковий рівні). Встановлено, що зі



зростанням параметра E/G' частота флаттера спадає, тобто пластина-смуга стає більш вразливою до дії аеродинамічного потоку.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chai, Y., Gao, W., Ankay, B., Li, F., Zhang, Ch. (2021). Aeroelastic Analysis and Flutter Control of Wings and Panels: A Review. *International Journal of Mechanical System Dynamics (IJMSD)*. P. 5–34.
2. Hebert, Ch., Cowan, D., Attar, P.J. and Weiseman C. D. (2011). *Aerodynamic Flutter*, NASA Langley Research Center.
- 3 Marchuk, M., Bodnar, V., Pakosh, V. (2024). The Behavior of a Plate Strip Compliant to Transversal Shear in Transonic and Hypersonic Flows. *Vibrations in Physical and Technical Systems*. (P. 65).
4. Marchuk, M. V., Pakosh, V. S., Kharchenko, V. M. (2014) Natural frequencies of layered composite plates-strips with components compliant to transverse shear and compression. *J. Math. Sci.*(203, No. 2). P. 185–192.
5. Osadchuk. V. A., Marchuk, M. V. (2005). Mathematical Model of Dynamic Deformation of Shear and Compressive Composite Plates. *Appl. Problems of Mechanics and Mathematics*. (Issue 3). P. 43–50 (in Ukrainian).
6. Theodorsen, T. and Garrick, I.E. (1940). Mechanism of Flutter a Theoretical and Experimental Investigation of the Flutter Problem. National Advisory Committee for Aeronautics. (Report No 685). N.A.C.A.
7. Ventsel, E., Krauthammer, T. (2001). *Thin Plates and Shells Theory: Analysis, and Applications*. 1st Edition. CRC Press.



Гребенюк С.М.¹, Спиця О.Г.²

¹завідувач кафедри фундаментальної та прикладної математики, д.т.н., професор, Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна, e-mail:

gsm1212@ukr.net

²доцент кафедри загальної математики, к.ф.-м.н., доцент, Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна, e-mail: spytso.o.g@gmail.com

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ З ПОРОЖНИСТИМИ ВОЛОКНАМИ ПРИ ДІЇ ТЕМПЕРАТУРИ

Розглядається застосування модифікації методу скінченних елементів – моментної схеми скінченного елемента – до визначення напружено-деформованого стану конструкцій із композиційного матеріалу з порожнистими волокнами при дії силового та температурного навантаження. Розв’язано задачу термопружності для порожнистого циліндру із композиту при дії внутрішнього тиску.

Ключові слова: композиційний матеріал, порожнисті волокна, напруження, деформації, метод скінченних елементів, термопружність, порожнистий циліндр.

Вступ. Складність задач механіки композитів полягає у тому, що виникає необхідність опису неоднорідності матеріалу. Врахування розташування кожного армуючого елемента у матеріалі, відмінності його властивостей від властивостей оточуючої матриці, їх взаємодії є дуже трудомісткою задачею. Застосування точних моделей веде до громіздких математичних співвідношень, використання яких на практиці у більшості випадків неможливе. Тому часто використовують інший підхід, коли спочатку представляють неоднорідний композиційний матеріал однорідним, властивості якого описуються ефективними механічними характеристиками. До цього гомогенізованого матеріалу застосовують традиційні методи, а беручи до уваги, що більшість реальних конструкцій мають складну геометрію та умови експлуатації на перший план виходять чисельні методи. Одним із універсальних методів є метод скінченних елементів.

Можна зазначити можливість багаторівневого застосування методу скінченних елементів як для гомогенізації (на мікрорівні), так і подальшого визначення напружено-деформованого стану конструкції із гомогенізованого матеріалу (на макрорівні) [1, 2]. Потреби практики вимагають наявності у сучасних САПР модулів, які б дозволяли



розв'язувати різноманітні задачі механіки композитів. Ці модулі, як правило, базуються на застосуванні методу скінченних елементів, так у роботі [3] для розрахунку листової ресори із композиту було використано програмне забезпечення ANSYS, а у роботі [4] на основі програмного комплексу Abaqus та його розширення було розв'язано низку задач механіки композитних конструкцій.

Застосування методу скінченних елементів до задач механіки конструкцій із композиційних матеріалів реалізовано у роботі [5], також використовуються уточнені схеми методу скінченних елементів, так, у роботі [6] при розв'язанні задачі пружності для конструкцій із композиційного матеріалу з суцільними волокнами використано моментну схему скінченного елемента, а у статті [7] цю саму схему використано для розрахунку конструкцій із композиту з сферичними та еліпсоїдними включеннями.

Матеріал і результати досліджень. Для розв'язання задачі термопружності конструкцій із композиційного матеріалу з порожнистими волокнами скористаємося таким підходом.

Спочатку проведемо гомогенізацію композиційного матеріалу. Якщо композиційний матеріал армований односпрямованими волокнами, то його можна представити однорідним транстропним матеріалом із площиною ізотропії, перпендикулярною осі волокон. Для розв'язання задачі термопружності за відомими формулами знаходяться ефективні механічні характеристики гомогенізованого матеріалу – п'ять пружних сталих та два температурні коефіцієнти лінійного розширення.

На другому етапі до конструкції із гомогенізованого матеріалу застосуємо метод скінченних елементів. Для нівелювання недоліків традиційної схеми скінченних елементів [6] застосуємо моментну схему скінченного елемента, яка базується на розкладанні у ряд Тейлора компонент вектору переміщень та компонент тензору деформацій із подальшим корегуванням розкладань компонент деформацій згідно певним правилам. Отримання системи розв'язувальних рівнянь відбувається на основі варіаційного принципу Лагранжа, а вплив температури задається формуванням додаткового вектору температурного навантаження.

Ці підходи реалізовані у виді пакету прикладних програм, за допомогою якого було розв'язано задачу термопружності для порожнистого циліндра під дією внутрішнього тиску. Температура вважалась сталою. Армування порожнистими волокнами задавалось у двох напрямках – у окружному та осьовому. Показано добру збіжність результатів розрахунків при різних сітках розбиття на скінченні елементи.



Висновки. На основі моментної схеми скінченного елемента запропоновано підхід до розв'язання задачі термопружності для конструкцій із композиційного матеріалу з порожнистими односпрямованими волокнами. Знайдено напружено-деформований стан порожнистого циліндра при дії температури та внутрішнього тиску для різних схем армування волокнами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Giuntoli, G., Aguilar, J., Vázquez, M., Oller, S., & Houzeaux, G. (2019). A FE^2 multi-scale implementation for modeling composite materials on distributed architectures. *Coupled Systems Mechanics*, 8(2), 99–109.
2. Li, S., & Hou, S. (2023). Two-scale concurrent optimization of composites with elliptical inclusions under microstress constraints within the FE^2 framework. *Comput. Struct.*, 276, 106942.
3. Geetha Satya Sai, S., Sailesh, V., Mobin, S.K., Subash Chandra Bose, T., Sai Krishna, Y., & Prasanthi, P.P. (2021). Analysis of Composite Leaf Springs Using Finite Element Method. In G.S.V.L. Narasimham, A.V. Babu, S.S. Reddy & R. Dhanasekaran (Eds.). *Recent Trends in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. (pp. 479–488). Singapore: Springer.
4. Barbero, E.J. (2023). Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
5. Müzel, S.D., Bonhin, E.P., Guimarães, N.M., & Guidi, E.S. (2020). Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review. *Polymers*, 12(4), 818.
6. Гребенюк, С.М., Гоменюк, С.І., & Клименко, М.І. (2019). Напружено-деформований стан просторових конструкцій на основі гомогенізації волокнистих композитів. Херсон: Гельветика.
7. Штанько, Г.І., & Гребенюк, С.М. (2023). Особливості побудови матриці жорсткості просторового шестигранного скінченного елемента для композиційного матеріалу з дискретними включеннями на основі моментної схеми. *Computer Science and Applied Mathematics*, (2), 75-85.



Єгоров Є.А.¹, Кучеренко О.Є.², Івченко Ю.В.³, Івченко О.М.⁴, Нікіфоров М.С.⁵

¹завідувач кафедри металевих конструкцій, д.т.н., професор, УДУНТ ННІ
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна, e-mail: evg_egorov@ukr.net

²старший науковий співробітник, к.т.н., Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
Дніпро, Україна, e-mail: ak_sci@proton.me

³доцент кафедри металевих конструкцій, к.т.н., доцент, УДУНТ ННІ
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна, e-mail: ivchenko.yuliia@pdaba.edu.ua

⁴аспірант кафедри металевих конструкцій УДУНТ ННІ «Придніпровська
державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна.

⁵аспірант кафедри металевих конструкцій УДУНТ ННІ «Придніпровська
державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНИЧНИХ СТАНІВ ТОНКОСТІННИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація. Досліджуються граничні стани тонкостінних оболонкових конструкцій при дії зовнішніх навантажень, в тому числі впливів від різноманітних вибухових пристроїв. Оболонкові конструкції подаються у вигляді скінченно-елементних моделей. Аналізуються ефекти, що виникають за певної комбінації навантажень (статичних, аеродинамічних, ударно-вибухових). Показано, що деякі положення чинних нормативних документів потребують певного доповнення і коригування.

Ключові слова: граничний стан, напружено-деформований стан, оболонка, тиск, навантаження, вибух.

Вступ. Наразі всі інженерні та будівельні конструкції розраховуються і проектується з використанням методу граничних станів. Граничні стани формулюються відповідно до характерних явищ, що виникають під час експлуатації конструкцій і якісно змінюють їхню поведінку під дією зовнішніх навантажень. Наприклад, в [1] для сталевих оболонок граничний стан за міцністю формулюється таким чином, щоб в будь-якій точці оболонки приведені напруження не перевищували величину розрахункового опору сталі, який визначається верхньою границею пружної роботи сталі. Граничний стан за



стійкістю обмежує величини відповідних напружень умовною σ_{max} де - максимальне напруження від сумарної дії зовнішніх навантажень; σ_{cr} - критичне значення напружень за загальною стійкістю). Проте досвід експлуатації конструкцій у вигляді сталевих оболонок (резервуари, силоси, газгольдери тощо) свідчить, що певні аспекти їхньої роботи залишаються поза увагою нормативних документів і потребують подальшого дослідження. Здебільшого це пов'язано з низкою ефектів, що обумовлені фізичною та геометричною нелінійностями, які виникають при деформаціях тонкостінних оболонок у складі тих чи інших конструкцій, а також з деякими особливостями зовнішніх навантажень. Ці обставини та їхні наслідки можуть суттєво впливати на надійність експлуатації і водночас не можуть бути визначені спрощеними інженерними розрахунками. Раціональний підхід до подолання цієї проблеми полягає у чисельному моделюванні роботи оболонкових конструкцій, як це показано, наприклад, у [2].

Мета цієї роботи полягає у формулюванні додаткових та коригуванні загальноприйнятих нормативних граничних станів оболонкових конструкцій, зокрема вертикальних циліндричних сталевих резервуарів, на основі чисельного моделювання їхньої поведінки під дією зовнішніх навантажень.

Матеріал і результати досліджень. Тонкостінні оболонки розглядаються як скінченно-елементні моделі в CAE (computer-aided engineering) системах. Напруженодеформований стан таких моделей досліджується в умовах дії вітрового та гідростатичного навантажень, навантажень від надлишкового тиску, а також від ударної хвилі, яка може виникати внаслідок вибухових впливів різної потужності.

Результати проведених досліджень дозволили виявити деякі важливі особливості в поведінці тонкостінних оболонкових конструкцій, які варто враховувати при формулюванні граничних станів цих споруд. Це, насамперед, встановлення і дослідження ефекту відриву днища резервуарної конструкції від основи [3]. Він може виникати в сталевих резервуарах, особливо за наявності надлишкового тиску в їхньому газовому просторі, і суттєво посилюватися при дії вітрового навантаження. За загальноприйнятих умов експлуатації сталевих резервуарів для зберігання нафтопродуктів цей ефект має локальний характер, але він може виявитися вкрай негативним для подальшої експлуатації внаслідок поступового накопичення пластичних деформацій.

Коригування потребує і визначення граничного стану, пов'язаного зі стійкістю циліндричної стінки (оболонки) вертикального резервуару під дією вітрового навантаження. Автори за допомогою програмних комплексів «ЛІРА» та OpenFOAM



провели обчислення параметрів стійкості відповідних тонкостінних циліндричних оболонок при дії внутрішнього вакууму та зовнішнього вітрового тиску. Зазначені обчислення дозволили дослідити низку ефектів, які треба враховувати при перевірках стійкості таких споруд. Отримані результати добре відповідають розрахунковим формулам [4] і підтверджують той факт, що прийнята в нормативних документах [5, 6] умова для врахування вітрового тиску не забезпечує необхідний рівень надійності.

Особливої уваги потребує визначення граничних станів циліндричних оболонок за дії ударної-вибухової хвилі. Аналіз закономірностей впливу надлишкового тиску і імпульсу разом із кінетикою руйнування дозволяє сформулювати умови для граничних станів резервуарних конструкцій з різним рівнем надійності, а також проектувати резервуари з підвищеним рівнем опору таким екстремальним впливам.

Висновки. Застосування чисельного моделювання конструкцій у вигляді тонкостінних оболонок дозволяє виявити певні ефекти, які формують основу для визначення додаткових (до нормативних) граничних станів цих конструкцій, що, у свою чергу, дозволяє підвищити безпеку і надійність їхньої експлуатації. Подальші дослідження за цим напрямом можуть полягати в проведенні серії чисельних експериментів, які дозволять сформулювати спрощені умови відповідних граничних станів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-198: 2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. (2014).
2. Yegorov, Y., & Kucherenko, O. (2023). Computer modelling of thin-walled shell structures with geometric imperfections. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (111), 205-213.
3. Yegorov, Y., & Kucherenko, O., & Repryntsev, O. (2023). Finite element modelling of the contact between shell structure and foundation. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (110), 421-429.
4. EN 1993-4-2:2007. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 4-2: Tanks. (2007).
5. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93.3 кПа. (1994).
6. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. (2006).



М.Бабешко¹, В.Савченко², С.Склепус³, П.Стеблянко⁴

¹д. фіз.-матем. наук, провідний наук. співробітник Інституту механіки ім.

С.П.Тимошенка НАНУ, Київ, Україна, e-mail: bab41@ukr.net,

²д. техн. наук, головний наук. співробітник Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка

НАНУ, Київ, Україна e-mail: savchenko_vitalij@ukr.net

³д. техн. наук, провідний наук. співробітник Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка

НАНУ, Київ, Україна, e-mail: snsklepus@ukr.net

⁴д. фіз.-матем. наук, професор, провідний наук. співробітник Інституту механіки ім.

С.П.Тимошенка НАНУ, Київ, Україна, e-mail: caf-vmi@ukr.net

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В ПРОЦЕСАХ ТЕРМОСИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. 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.

Ключові слова: термопластичність, визначальні рівняння, вид напруженого стану, пластичне розпушення матеріалу, чисельні методи

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 скінчених 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 В-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 матеріалоємність та прогнозувати ресурс при різних режимах роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. Галішин О.З., Склепус С.М. (2024). Нелінійне деформування гнучких пологих болонок 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, CD, P. 507-1084". P. 623-630.



Підгорний М. В.¹, Бойко В. В.², Цоколенко А. С.³, Паламарчук О. С.⁴, Литовченко В.В.⁵

¹професор кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу, к.т.н., доцент,
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна, e-mail:

pmv1971pmv@gmail.com

²доцент кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу, к.т.н., Черкаський
державний технологічний університет, Черкаси, Україна, e-mail: vlboyko17@gmail.com

³магістрант, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси,
Україна

⁴ доцент, к.т.н., Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

⁵науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і
сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна, akronimail@gmail.com

АНАЛІЗ СКЛАДНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ МЕРЕЖ БАЙЄСА

Мережі Байєса – це потужний інструмент у галузі штучного інтелекту та машинного навчання, що дозволяє моделювати ймовірнісні залежності між змінними. Ці мережі використовуються для аналізу складних систем, де невизначеність відіграє значну роль. Застосовуються мережі Байєса в різних галузях, включаючи управління ризиками, медицину, розпізнавання образів, аналіз текстів. Мережі Байєса дозволяють створювати моделі, простіше інтерпретуються для прийняття рішення в умовах невизначеності. У роботі досліджується ефективність мереж Байєса в задачах моделювання на їх основі складних систем.

Ключові слова: мережі Байєса, штучний інтелект, машинне навчання, невизначеність, модель.

Складні системи у загальному випадку використовують r ресурсів різноманітної фізичної природи $R_v^{(t), v=1,2,\dots,r}$, що у визначеній послідовності надходять від підсистем M_v . Сукупність усіх ресурсів $R \{R_v^{(t)}\}$ утворює системний ресурс складної системи на всій множині макростанів $S \{S_j\}$. Цю сукупність можна представити як r -ку процесів $\{R_1(t), R_2(t), \dots, R_v(t), \dots, R_r(t)\}$ [1]. "Вкласти" динаміку цих процесів, у дискретну множину макростанів $S \{S_j\}$ рекомендується можливим за допомогою логіко-динамічних моделей. Логіку переходів на множині S задає набір предикатів $L_j \in L^s$, логіку дискретних змін у просторі кожного з процесів $R_v^{(t)}$ задає набір предикатів



$L_i^* \in L^*$. Динаміка системного ресурсу $R_s(t)$ набуває вид складної логіко-динамічної моделі [2]:

$$R_s(t) = \sum_j L_j^s \sum_i L_i^v R_{v_i}(t),$$

що визначена «уздовж» шляхів $\Pi(S_j)$ і на множині операцій взаємодії підсистем M_v .

Графічні моделі таких систем на основі мережі Байєса, які використовуються для представлення та аналізу залежностей між процесами складаються з вузлів, що представляють змінні, та дуг, що визначають залежності між цими змінними. Основна ідея полягає в тому, що кожен вузол має умовну ймовірнісну таблицю (СРТ), яка визначає ймовірність значення змінної залежно від стану її батьківських вузлів. Ці мережі дозволяють ефективно моделювати невизначеність і приймати рішення в умовах неповної інформації. Вони дозволяють створювати моделі, які легко інтерпретуються і можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень. Таким чином, поданий апарат опису системи «система - середовище функціонування» дозволяє конструктивно уявити програму цільового використання системи в заданому середовищі функціонування. Якщо вважати задачу "внутрішнього" опису і моделювання системи і середовище функціонування, то постає можливим побудувати відображення $\varphi^{ce}: \{G\} \rightarrow \{R\}$ ("цілі - ресурси"). Таке відображення і моделювання в просторі процесів $X_0^* \cdot X_0^*$ дозволяє вирішити основні задачі ціледосягнення системи в заданому середовищі функціонування.

Висновок. Розглянута в даній роботі система надає можливість прогнозування та підтримки прийняття рішень. Наведені підходи до проектування систем мають перевагу в порівнянні з іншими алгоритмами, такі як: відсутність потреби мати повну інформацію про систему що аналізується, змога до динамічного саморозвитку, гнучкість у застосуванні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Стаття на веб ресурсі «Bayesian networks - an introduction». URL: <https://www.bayesserver.com/docs/introduction/bayesian-networks/> (дата посилання – 28.02.2025);
2. Стаття мічиганського університету на веб ресурсі «Libre texts»: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_\(Woelfel\)/13%3A_Statistics_and_Probability_Background/13.05%3A_Bayesian_network_theory](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woelfel)/13%3A_Statistics_and_Probability_Background/13.05%3A_Bayesian_network_theory) (дата посилання – 28.02.2025).



Засядько А. А.¹, Ракша В.М.², Рижков О.В.³, Роллер Д.В.⁴

¹провідний науковий співробітник, д. т. н., професор, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси,

Україна, e-mail: sagitta@bigmir.net

²науковий співробітник – інженер-випробувач, к. ф. - м. н., Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки,

Черкаси, Україна, e-mail: vmraksha@gmail.com

³начальник науково-дослідної лабораторії супутникових навігаційних систем вимірювань та їх випробувань науково-дослідного відділу трасових систем та спеціалізованих програмних засобів науково-технічного комплексу вимірювань, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна, e-mail: ar1970@ukr.net

⁴молодший науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна, e-mail:

dmytroroller@gmail.com

МОДЕЛЬ ТЕСТУВАННЯ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ НА ОСНОВІ ГРАНИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ

Для оцінки надійності військової техніки в умовах, близьких до граничних, запропоновано застосувати математичну модель тестування на граничні значення. Розроблена математична модель тестування на граничні значення дозволяє визначити граничні показники через тестування за набором сценаріїв, прогнозуючи можливі відмови та вплив кожного рівня на загальну надійність системи. Тестування граничних значень допомагає підвищити ефективність і надійність процесу оцінки зразків військової техніки.

Ключові слова: військова техніка, надійність, відмови, методи оцінювання ризику, сценарії.

Тестування на граничні значення дозволяє не лише визначити критичні точки, але й забезпечує оптимізацію конструктивних та технічних тактико-технічних характеристик (ТТХ) на етапі проектування, що знижує ризики відмови в реальних умовах бойового застосування. Крім того, це дає змогу розробникам краще зрозуміти, як



система буде працювати в найгірших можливих сценаріях, що допомагає прогнозувати її витривалість і оптимізувати подальшу модернізацію військової техніки (ВТ) [1, 2].

Відокремимо можливості сценаріїв для оцінки надійності ВТ:

- моделювати реальні та екстремальні умови експлуатації об'єктів, такі, як: кліматичні фактори, механічні навантаження, електромагнітні впливи тощо;
- виявляти слабкі місця проблемних компонентів та потенційні вузли відмови на ранніх стадіях життєвого циклу, для оптимізації конструкції, матеріалів та технологій;
- оцінювати ефективність систем діагностики, контролю і безпеки та інших засобів, призначених для запобігання аварійним ситуаціям;
- оптимізувати технічне обслуговування та ремонт, що знижує витрати та підвищує готовність ВТ.

Для визначення граничних показників, зокрема з використанням сценаріїв для діагностики і випробувань ВТ, необхідно врахувати механізми обчислення граничних значень, ймовірності відмов, а також вплив помилок, що виникають на різних етапах тестування [3, 4].

Наведемо математичну модель побудови сценаріїв. Математична модель сценарію для оцінки граничних значень містить три вектори: вектор вхідних даних $\mathbf{D}_j$, $j=1,...,k$, вектор очікуваних результатів $\mathbf{E}_l$ та вектор фактичних результатів $\mathbf{R}_l$, де $l=1,...,m$.

Нехай TC_i – сценарій для i -го параметра СВТ, $i=1,...,n$, що підлягає тестуванню:

$$TC_i(D_l, E_l) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } R_l \approx E_l (\text{ТТХ відповідає очікуванім}) \\ 0, \text{ якщо } R_l \neq E_l (\text{ТТХ не відповідає очікуванім}) \end{cases} \quad (1)$$

Сценарій вважається успішним, якщо результат $TC_i(\mathbf{D}_l, \mathbf{E}_l) = 1$.

Математична модель може бути застосована як на стадії розробки нових зразків СВТ, так і для оптимізації існуючих систем, що сприятиме підвищенню їх витривалості та надійності в умовах бойових дій за участі ВТ.

Оскільки процес тестування включає граничні значення параметрів, їх можна визначити через функцію ймовірності відмови для кожного граничного значення.

Нехай L_i – граничне значення для i -го параметра. Тоді ймовірність відмови кожної окремої змінної $Q_i(L_i)$ можна описати через функцію розподілу ймовірностей:

$$Q_i(L_i) = P(R_i < L_i).$$

Якщо $R_i < L_i$, об'єкт тестування (система) працює без відмов.

Загальна ймовірність відмови для кожного параметра i визначається як сума ймовірностей відмов для всіх чотирьох варіантів граничного тестування, що уявляє собою комбіноване врахування граничних значень:



$$Q_{\Sigma i} = \sum_{k=1}^4 Q_{ki}(L_{ki}) \quad (2)$$

Якщо існує кілька змінних n для i -го параметра, що одночасно впливають на деяке граничне значення L_i , то їхній вплив на ймовірність відмови $Q_i(L_i)$ оцінюється як векторний добуток:

$$Q_i(L_i) = \prod_{j=1}^n Q_{ij}(L_{ij}) \quad (3)$$

Із формул (2), (3) витікають умови, що істотно знижують загальну ймовірність безвідмовної роботи системи: як значні значення результуючої $Q_{\Sigma i}$ для будь-якого параметра i в сумі (2), так і загальна ймовірність відмови для i -го параметра може бути викликана комбінацією декількох параметрів одночасно.

Загальна функція надійності системи при проведенні тестування з граничними значеннями оцінює вплив тестових сценаріїв на систему і враховує всі варіанти тестування:

$$P(R) = P_{base}(R) \cdot \prod_{i=1}^n (1 - Q_{\Sigma i}), \quad (4)$$

де $P_{base}(R)$ – базова функція надійності всієї системи, а Q_{Σ} враховує суму варіантів тестування для всіх параметрів i .

Формула (4) дозволяє врахувати вплив тестування граничних значень на надійність системи. Якщо всі значення ТТХ значно менші за граничні значення, загальна функція надійності залишається близькою до базової функції $P_{base}(R)$.

Остаточна оцінка результатів тестування здійснюється через порівняння фактичних результатів з очікуваними значеннями ТТВ та врахування можливих помилок на кожному етапі. Якщо на будь-якому з етапів тестування ТСі виявляється помилка, група залучених до тестування фахівців визначає можливість коригування даного параметра і робиться остаточний висновок, чи є даний зразок СВТ або ВТ придатним для подальшої експлуатації.

Висновок. Розроблена математична модель тестування на граничні значення дозволяє суб'єктам проведення випробувань чітко оцінити вплив сценаріїв на надійність зразків ВТ та їх складових.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. VINTR, Zdenek & Hoang Anh, Dung. (2021). Accelerated Reliability Testing of Combat Vehicles Electronic Parts Based on Multifactor Stress. 2804-2809. https://doi.org/10.3850/978-981-18-2016-8_590-cd;
2. Johnson, B. (2021). Modeling and Simulation Analysis of a Complex Adaptive



Systems of Systems Approach to Naval Tactical Warfare. In: Braha, D., et al. Unifying Themes in Complex Systems X. ICCS 2020. Springer Proceedings in Complexity. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67318-5_17;

3. Shea, J.J. (2005). Accelerated Testing- Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis [Book Review]. Electrical Insulation Magazine, IEEE. 21. 61 - 62. <https://doi.org/10.1109/MEI.2005.1437623>;

4. McCarthy, James. (2008). Military Applications of Adaptive Training Technology. Technology Enhanced Learning: Best Practices. 304-347. <https://doi.org/10.4018/978-1-59904600-6.ch013>.



Литовченко В.В.¹, Швець С. І.², Цуканов Я. О.³, Підгорний М. В.⁴, Мельник В. П.⁵

¹ науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна, akronimail@gmail.com

² старший науковий співробітник – старший інженер-випробувач, Державний науководослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна, e-mail: 44sbdr44@ukr.net

³ науковий співробітник – інженер-випробувач, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна, e-mail: gpz4104@gmail.com

⁴ професор кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу, к.т.н., доцент, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна, e-mail: pmv1971pmv@gmail.com

⁵ начальник факультету пожежної безпеки, к.т.н., доцент, Навчально-науковий інститут пожежної безпеки, Черкаси, Україна

СТІЙКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМ ЗАСОБОМ

Стійкість та надійність роботи безступінчатих трансмісій (БТ), таких як пасові та ланцюгові варіатори, відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності, безпеки та комфорту сучасних транспортних засобів (ТЗ). У контексті інтелектуальних систем керування транспортними засобами (ІСКТЗ), які використовують адаптивні алгоритми та працюють у реальному часі, стійкість передачі сигналів є критично важливою. Вона дозволяє точно регулювати такі параметри БТ, як ковзання, вібрації та співвідношення передач, що забезпечує стабільну й безперебійну роботу системи навіть у змінних умовах експлуатації.

Ключові слова: стійкість, інтелектуальні системи керування, передача сигналів, функція Ляпунова.

Класичний підхід до вирішення керованості ТЗ з БТ було розглянуто на міжнародному симпозіумі з автомобільних технологій і автоматизації [1]. Блок керування на основі мікрокомп'ютера та пов'язані з ним електрогідравлічні регулювальні клапани. Поєднання БТ з ІСКТЗ дає змогу моніторити стан трансмісії в реальному часі та прогнозувати можливі проблеми.



Основною складністю в роботі БТ є забезпечення стійкості в динамічно змінюваних умовах експлуатації ТЗ. Ці фактори можуть викликати вібрації, макроковзання та втрату ефективності, особливо в пасових і ланцюгових варіаторах. Нестабільність призводить до зносу компонентів, зниження паливної економічності та погіршення комфорту водіння.

Стійкість передачі сигналів є критично важливою для ІСКТЗ. Вона забезпечує надійну взаємодію між компонентами системи, що є основою для безперебійної роботи ТЗ та гарантування безпеки на дорозі. БТ дозволяють ТЗ адаптуватися до змінних умов руху. Проте їхня ефективність залежить від стабільної передачі керуючих сигналів, які регулюють ковзання, вібрації та оптимальне співвідношення передач.

Дослідження показують [2], що використання нечіткої логіки для регулювання затискної сили дозволяє зменшити ковзання на 12,86–21,65% і підвищити ефективність CVT на 3,71%. Проте такі системи залежать від стабільної передачі сигналів для точного налаштування параметрів у реальному часі.

Аналіз вібрацій [3] пасових варіаторів виявив резонансні частоти (наприклад, 4 560 об/хв), які можуть дестабілізувати систему. Для уникнення цього необхідно точно регулювати робочі режими, що також вимагає стійкого керування.

Існуючі рішення не завжди враховують повний спектр динамічних змін умов експлуатації ТЗ. Нестабільна передача сигналів може спричинити затримки чи збої в системі керування, що негативно позначається на роботі БТ.

Для підвищення стійкості передачі сигналів у ІСКТЗ пропонується використовувати метод Ляпунова, зокрема похідну функцію Ляпунова, яка дозволяє математично оцінити та гарантувати стійкість передачі сигналу ІСКТЗ, зокрема потужності ТЗ на ведучі колеса.

Висновок. Стійкість передачі сигналів є фундаментом ефективної роботи ІСКТЗ. Використання похідної функції Ляпунова дозволяє не лише аналізувати, а й забезпечувати стійкість системи, гарантуючи її повернення до рівноважного стану після збурень. Інтеграція цього підходу з існуючими методами, такими як контроль ковзання чи управління вібраціями, може значно підвищити стабільність, ефективність і довговічність БТ у сучасних ТЗ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. ISATA 84, "In Pursuit of Technical Excellence". Proceedings Volume 1. International Symposium on Automotive Technology and Automation with particular reference



to Vehicle Management Systems and Flexible Manufacturing Systems, Milan, Italy 24-28 September 1984;

2. Fu, B.; Zhu, T.; Liu, J.; Hu, X. Research on Clamping Force Control of CVT for Electric Vehicles Based on Slip Characteristics. *Sensors* 2022, 22, 2131. <https://doi.org/10.3390/s22062131>;

3. Kot, Adam and Łatas, Waldemar. "Experimental and theoretical investigation of CVT rubber belt vibrations" *Open Engineering*, vol. 11, no. 1, 2021, pp. 1196-1206. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0121>.



Батутіна Т.Я.¹, Клименко Д.В.², Олійник В.Н.³

¹ Начальник сектору. Державне підприємство «конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпро, Україна, e-mail: tatanabatutina46@gmail.com

² Начальник відділу. Державне підприємство «конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпро, Україна, e-mail: KLUMENKO_DV@hotmail.com

³ старший науковий співробітник, канд. фіз.-мат. наук., інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна, e-mail: v_oliynik@yahoo.com

ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ПІДОБТІЧНИКОВОМУ ПРОСТОРІ З УРАХУВАННЯМ КОЕФІЦІЄНТА ЗАПОВНЕННЯ

Анотація. Під час інтеграції корисного вантажа (КВ) у ракету-носій (РН) одним з важливих питань постає питання які акустичні навантаження будуть діяти у підобтічковому просторі на КВ. Як правило буває, що РН вже достатньо відпрацьований і зовнішні акустичні навантаження на обтічник відомі. При цьому конфігурація КВ і як слідство коефіцієнт заповнення підобтічкового простору відрізняються від мавших місце на попередніх пусках. Акустичні навантаження на конструктивні елементи і апаратуру КВ є одним з факторів ризику, який може спричинити порушення його функціонування. Тому при ескізному проектуванні потрібно провести швидку та якісну оцінку рівня акустичного навантаження конкретного КВ.

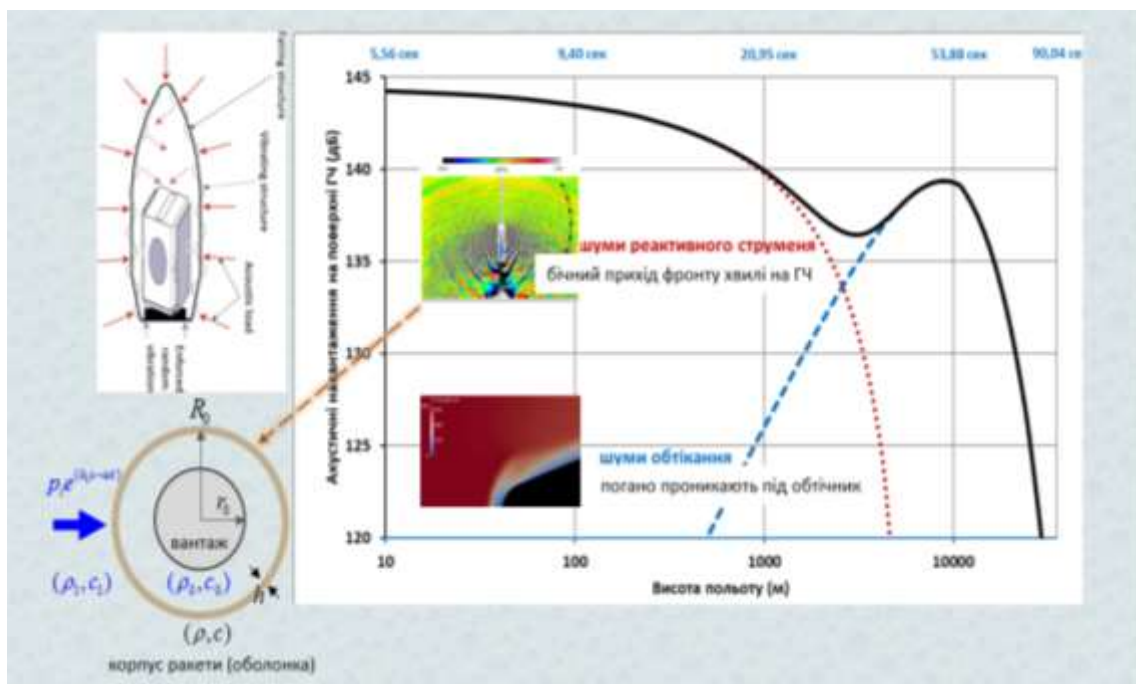
Ключові слова: підобтічковий простір, акустичні навантаження, наскрізна задача, повздовжно-згинальні коливання, акустопружна взаємодія, звукове поле, частотно-просторовий розподіл

Вступ. Основна задача поточного дослідження полягала у формуванні фізико-математичної моделі передачі звукових коливань з навколишнього середовища у підобтічковий простір головної частини РН через стінки головного обтічника. Як результат були отримані кількісні оцінки частотно-просторових розподілів звукового поля й визначені діапазони реалізації потенційно небезпечних режимів акустичного навантаження поверхні корисного вантажу, який розміщено всередині головної частини.

Було змодельовано падіння хвильового фронту на оточений атмосферним повітрям корпус ракети у вигляді тонкої пружної циліндричної оболонки, всередині якої розташовано корисний вантаж. Акустичний зв'язок між корпусом і вантажем забезпечує повітря, утримуване під головним обтічником.



Матеріал і результати досліджень. З точністю до статистичного фазового наповнення сигналу, в розглянутій системі реалізується класичний сценарій проходження акустичної хвилі через межу розподілу середовищ з різними параметрами, зокрема, густинами й швидкостями поширення об'ємних чи поздовжніх хвиль. Корпус ракети, який розділяє зовнішню та внутрішню області, з механічної точки зору, є тонкостінною оболонкою, на яку падає фронт акустичної хвилі. Корисний вантаж, розташований всередині обтічника, моделювався монолітною вставкою з заданими властивостями. У рамках цих припущень було розглянуто спрощену двовимірну математичну модель. Вважалося, що поверхні вантажу й обтічника в поперечному перерізі є концентричними колами з радіусами r_0 і R_0 відповідно. Товщину оболонки позначено як h . Попри ігнорування скінченності поздовжніх розмірів РН, такий підхід дозволяє доволі достовірно оцінити рівні й характер розподілів акустичних навантажень в окружному напрямку [1]. За необхідності, його можна узагальнити на тривимірну постановку [2].



Моделюючи рівняння: Розглядалося падіння на циліндричну оболонку моноспектральної складової акустичних навантажень у вигляді плоскої хвилі з круговою частотою й амплітудою достатньо малою для того, щоб було правомірним застосування наближення лінійної акустики.

$$\omega = 2\pi f : P(x)e^{-i\omega t} = p_i e^{i(kx - \omega t)}$$



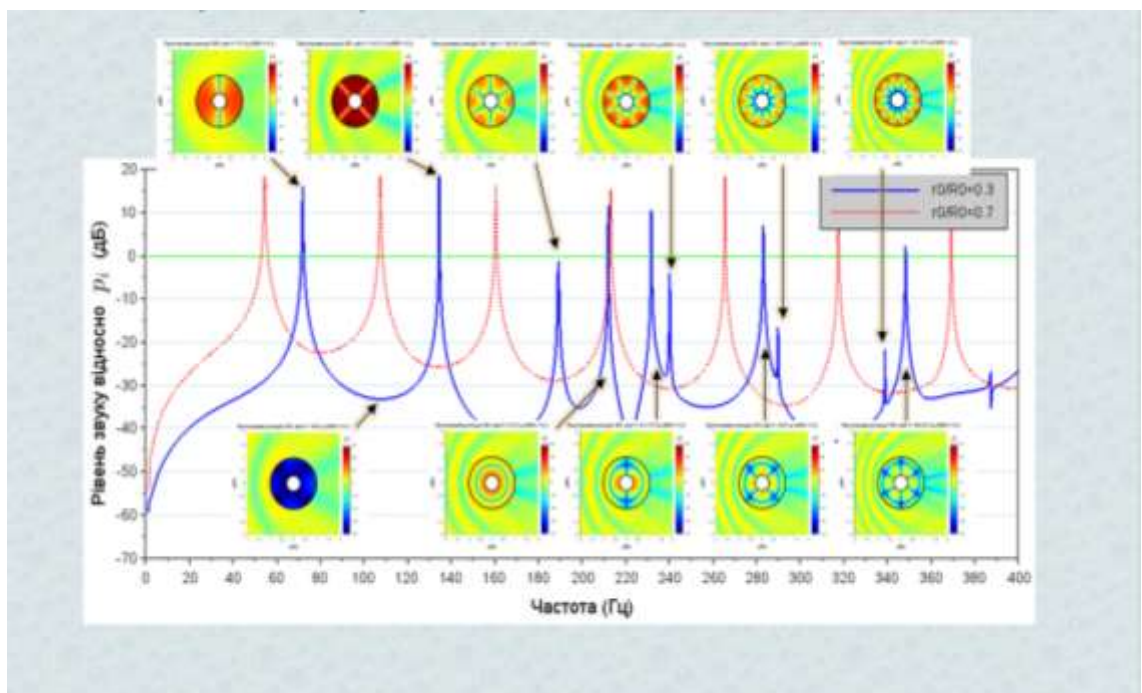
Вважалося, що зовнішня та внутрішня відносно корпусу РН області заповнені акустичними середовищами з густинами й швидкостями звуку, в яких справедливі рівняння Гельмгольца для потенціалів коливальної швидкості $\rho_{1,C1}$ і $\rho_{2,C2}$ (як і раніше, індекс 1 присвоєно зовнішній, а 0 – внутрішній області):

$$\frac{\partial^2 \Phi_{0,1}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_{0,1}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi_{0,1}}{\partial \varphi^2} + k_{0,1}^2 \Phi_{0,1} = 0, \quad k_{0,1} = \omega / c_{0,1}.$$

Радіальна координата r – це відстань від осі ракети, а кут φ відраховується проти годинникової стрілки від напрямку поширення хвилі

Матеріали досліджень. Виявлено, що при низьких механічних втратах в оболонці ступінь проникнення звуку на поверхню корисного вантажу суттєво залежить як від частоти, так і від коефіцієнта заповнення. Відповідна частотна характеристика має низку резонансних максимумів, пов'язаних з реалізацією окружних мод низькочастотних поздовжньо-згинальних коливань оболонки, підкріпленої пружністю шару повітря між корпусом і поверхнею вантажу.

При цьому внесок резонансів, індукованих переважно окружними коливаннями системи, швидко спадає з ростом номера моди. Серія ж піків, пов'язаних, зокрема, з резонансом пульсацій внутрішнього шару повітря, відзначається більшою стійкістю.



Висновки. З огляду на це, для захисту підобтічникового простору від надмірних акустичних навантажень доцільно розміщувати на внутрішній поверхні корпусу ракети демфіруючі покриття чи елементи, які б сприяли руйнуванню кількох нижчих окружних мод. На додачу рекомендується захист поверхні корисного вантажу за допомогою звукопоглинаючих покриттів.

Принагідно зазначимо, що аналогічний характер частотної залежності акустичних навантажень для деформівних моделей головної частини спостерігався і в інших дослідженнях [3].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Maruf Morshed M. M. Investigation of external acoustic loadings on a launch vehicle fairing during lift-off. Adelaide : University of Adelaide, 2008. 249 p.
2. Maruf Morshed M. M., Hansen C. H., Zander A. C. Prediction of acoustic loads on a launch vehicle: nonunique source allocation method. Journal of Spacecraft and Rockets. 2015. Vol. 52, № 5. P. 1478–1485.
3. Howard C. Q., Hansen C. H., Zander A. C. Noise reduction of a rocket payload fairing using tuned vibration absorbers with translational and rotational DOFs. Proceedings of the Annual Conference of the Australian Acoustical Society: 'Acoustics in a changing environment'. Busselton, Western Australia, 2005. P. 1–7.



Валерій Сатокін¹

¹провідний фахівець, ДП «КБ «Південне», Дніпро, Україна, e-mail: ofsale@gmail.com

РОЗРОБКА РЕГУЛЯРНИХ СТРУКТУРОВАНИХ СІТОК ДЛЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ПРИКЛАДІ АНАЛІЗУ НДС В ПРЯМОКУТНІЙ ПЛАСТИНІ З ОТВОРОМ

Анотація. Проведений аналіз довільної та регулярної і структурованої моделей при скінченно-елементному аналізі прямокутної пластини з отвором під дією рівномірних розтягуючих сил.

Ключові слова: Концентратори напружень, прямокутна пластина з отвором, ANSYS.

Вступ. Скінченно-елементне моделювання концентраторів напружень вимагає виваженого підходу і аналізу. Особливо у випадках, коли дані експериментів підтверджені десятиліттями досліджень. В роботі розглядається моделювання прямокутної пластини з циліндричним отвором під дією рівномірних розтягуючих сил. На мій погляд найкраще це описує Степан Прокопович Тимошенко, далі наведена цитата з [1] (56 параграф на 249 сторінці): «Якщо в пластині, під дією рівномірно розтягуючих напружень σ , зроблений малий круглий отвір (діаметр отвору менше, скажімо $1/5$ ширини пластини), то в точках mn (рисунок 174, a), має місце висока концентрація напружень. Точна теорія (Ця теорія була запропонована Kirsch'ом, Z/ Ver. deut. Ing., 1898. Див. Також Timoshenko and Goodier, Theory of Elasticity, стор. 78, 1951) показує, що розтягуючі напруження в цих точках дорівнюють 3σ ». Таке просте співвідношення між навантаженням і напруженнями дозволяє швидко оцінювати напружений стан конструкції і якість побудованої скінченно-елементної моделі.

Матеріал і результати досліджень. При скінченно-елементному моделюванні конструкцій для аналізу їх міцності наявний рівень розвитку обчислювальної техніки дозволяє будувати сітки з мільярдів елементів, що дозволяє наблизитись в розрахунках до аналітичних і експериментальних результатів. Але час на розрахунок залишається дуже важливим чинником. Саме тому і пропонується регулярне і структуроване скінченно-елементне моделювання концентратора напружень у вигляді циліндричного отвору у прямокутній пластині. Моделювання проводилось в комплексі скінченно-елементного



аналіз у ANSYS. Розглянуто два варіанти побудови скінченно-елементної сітки пластини з отвором – довільний, з елементів типу «піраміда» і регулярний, з елементів типу «цеглина».

Критерієм для якості і достовірності обираємо залежність між прикладеними і отриманими напруженнями, а саме: прикладаємо 1 – маємо отримати 3.

На рисунку 1 показані розглянуті об'ємні моделі пластини з отвором.

На рисунку 2 показані розглянуті скінченно-елементні моделі пластини з отвором.

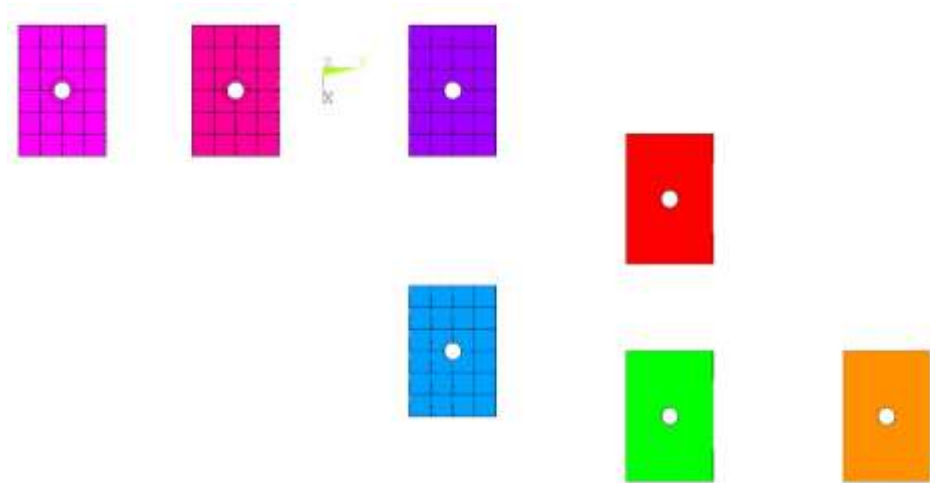


Рисунок 1 – Об'ємні моделі

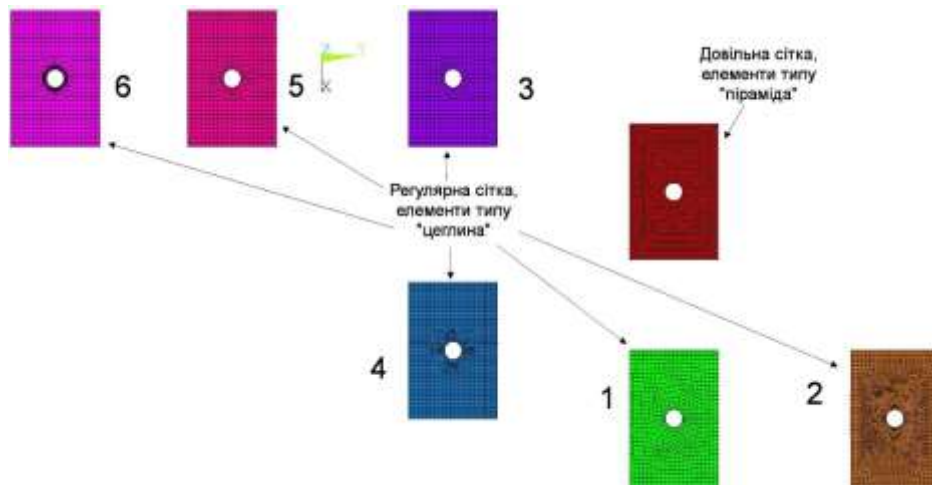


Рисунок 2 – Скінченно-елементні моделі

При побудові довільної скінченно-елементної моделі розглядався варіант з кількістю елементів, достатньою для виконання критерію «прикладаємо 1 – маємо отримати 3».

При побудові регулярної скінченно-елементної моделі були розглянуті шість варіантів моделювання: 1 – регулярна сітка без додаткового моделювання; 2 – об'ємна модель як в 1, але збільшена кількість елементів; 3 – об'єм пластини розрізаний на



прямокутники; 4 – об’ємна модель як в 3, але збільшена кількість елементів; 5 – об’єм пластини розрізаний на прямокутники і навколо отвору додатково побудований в пластині циліндр; 6 – об’ємна модель як 5, але збільшена кількість елементів в додатковому циліндрі.

Найефективнішою з розглянутих моделей виявилась модель 5. Введення додаткового геометричного циліндру навколо отвору дозволило не тільки задовольнити критерій, а і оптимізувати кількість елементів та керувати їх регулярністю, саму пластину зробити структурованою. Радіус додаткового циліндру навколо отвору вибраний розміром 1.5 радіусу отвору, цього достатньо для того, щоб елементи навколо концентратора були однаковими по всьому об’єму кільця навколо отвору.

На рисунку 3 показані результати моделювання і розрахунку пластини з довільною сіткою. В моделі 105579 вузлів, час на розрахунок 63.68 секунди.

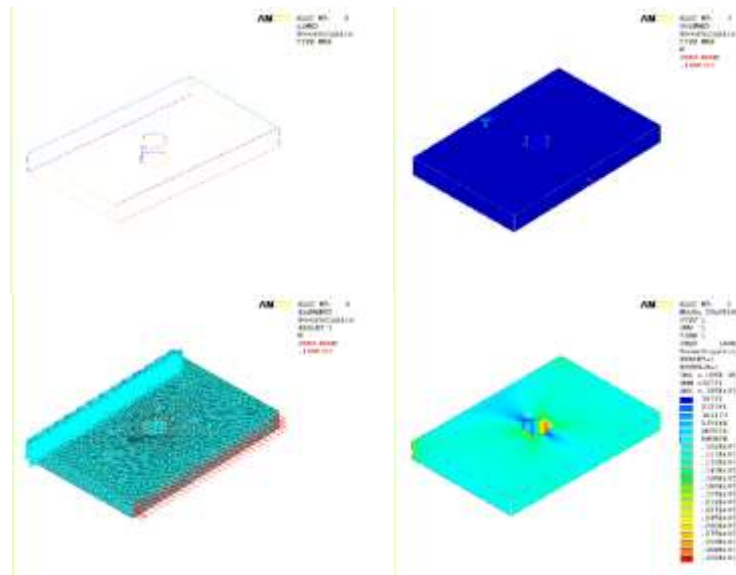


Рисунок 3 – Моделювання і результати розрахунку довільної сітки

На рисунку 4 показані результати моделювання і розрахунку пластини з регулярною структурованою сіткою. В моделі 4170 вузлів, час на розрахунок 0.42 секунди.

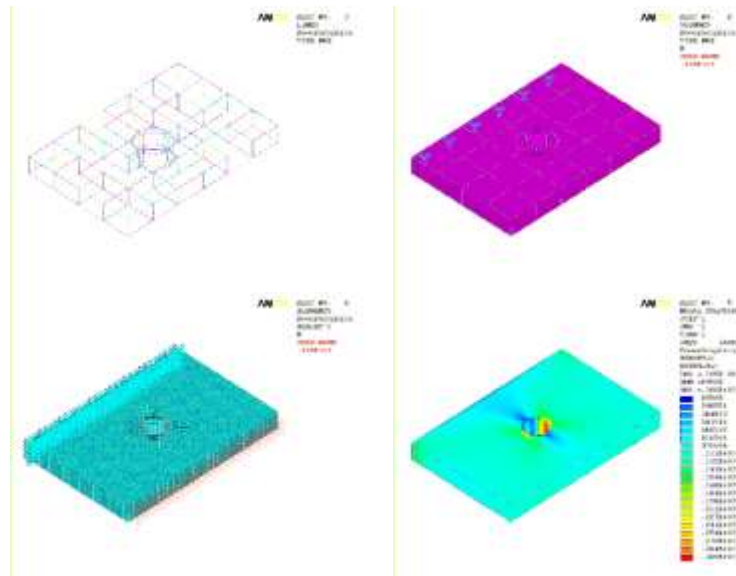


Рисунок 4 – Моделювання і результати розрахунку регулярної структурованої сітки

Висновки. Аналіз і порівняння розрахунків показують ефективність і доцільність використання регулярної структурованої скінченно-елементної сітки. Такі сітки дозволяють отримувати при моделюванні результати, максимально відповідні до реальних випробувань і досліджень, та значно скорочувати час на розрахунки. Наприклад на розрахунок балкового мосту, який містить 10000 отворів при довільному моделювання потрібно 177 годин, а при регулярному і структурованому 70 хвилин, звичайно це за умови пропорційної інтерполяції, в реальності, при додаванні контактних взаємодій ця різниця буде ще більше.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тимошенко С.П. (1965). *Опір матеріалів*. Наука. т.2, с.249



Салогор Володимир¹, Каменецький Валерій²

¹Молодший науковий співробітник науково-дослідного відділу полігонних випробувань засобів розмінування, боєприпасів, вибухових речовин, навчально-науковий випробувальний полігон високотехнологічного озброєння та військової техніки, місто Черкаси, Україна, e-mail: work.v.salohor@gmail.com.

²Провідний науковий співробітник – провідний інженер-випробувач науково-дослідного відділу полігонних випробувань засобів розмінування, боєприпасів, вибухових речовин, навчально-науковий випробувальний полігон високотехнологічного озброєння та військової техніки, місто Черкаси, Україна.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПРОБЛЕМАХ МЕХАНІКИ ТА У МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ

Анотація. Розглянуто сучасні підходи до моделювання та застосування інформаційних технологій у механіці та матеріалознавстві. Висвітлено ключові методи комп'ютерного моделювання, зокрема метод скінченних елементів, молекулярну динаміку та машинне навчання, що дозволяють значно підвищити ефективність проєктування механічних конструкцій і нових матеріалів. Проаналізовано практичні аспекти використання ІТ.

Ключові слова: моделювання, матеріалознавство.

Моделювання та застосування інформаційних технологій у механіці та матеріалознавстві є ключовим напрямом сучасних наукових досліджень, що дозволяє значно підвищити точність розрахунків, оптимізувати експериментальні процеси та знизити витрати на розробку нових матеріалів. Використання комп'ютерного моделювання, машинного навчання та чисельних методів сприяє створенню більш ефективних і довговічних конструкцій, прогнозуванню властивостей матеріалів та розробці інноваційних технологій їх виробництва.

Сучасний розвиток науки і техніки значною мірою залежить від ефективного використання інформаційних технологій у різних галузях знань, зокрема у механіці та матеріалознавстві. Інформаційні технології (ІТ) відкривають нові можливості для аналізу, проєктування та оптимізації механічних конструкцій і матеріалів, що застосовуються в машинобудуванні, авіаційній та космічній промисловості, біомеханіці та багатьох інших сферах.



Розглянемо роль комп'ютерного моделювання, чисельних методів і штучного інтелекту у вирішенні актуальних задач механіки та матеріалознавства, а також перспективи їхнього подальшого розвитку та впровадження у науково-технічну практику.

Механіка як наука займається дослідженням руху та взаємодії тіл під впливом різних сил. Сучасні проблеми механіки часто потребують високоточного моделювання фізичних процесів, що ускладнює використання традиційних аналітичних методів. У зв'язку з цим все більшу популярність набувають чисельні методи та комп'ютерне моделювання задач механіки, пов'язаних з нескінченними або складними областями, дослідження аеродинаміки, теплообміну та інших фізичних процесів.

Завдяки інформаційним технологіям можливо розробляти більш надійні, економічно вигідні та ефективні механічні конструкції, провести аналіз напружень, деформацій та інших механічних характеристик конструкцій, оптимізувати механічні системи, прогнозувати їх поведінку та автоматизувати процеси управління.

Сучасні технологічні процеси допомагають створенню, завдяки вже відомим властивостям, структурі та поведінці матеріалів у різних умовах експлуатації, нових матеріалів з унікальними характеристиками, що робить застосування комп'ютерного моделювання невід'ємною частиною досліджень у цій галузі.

Інформаційні технології, що застосовуються у матеріалознавстві, значно прискорюють розробку нових матеріалів, підвищують їхню якість і дозволяють знизити витрати на експериментальні дослідження. Використання цих методів дають змогу моделювати поведінку атомів і молекул у матеріалах для передбачення їхніх механічних та фізичних властивостей, прогнозувати характеристики матеріалів на основі великих масивів експериментальних та симуляційних даних. Сприяють створенню нових матеріалів з наперед заданими властивостями та допомагають обирати оптимальні склади сплавів, полімерів та композитів, а також оцінювати їхню довговічність.

До побудови моделей механіки набули особливого розвитку при дослідженні взаємодії матеріальних середовищ з електромагнітними полями, при побудові теорії деформації електропровідних тіл, поширеної на електропровідні суміші та тверді розчини, і при дослідженні механотермоелектродифузійних явищ в приконтактних шарах. Багато уваги було приділено питанням побудови розрахункових моделей термopужності тіл кусково-однорідної та неоднорідної структури з використанням апарату узагальнених функцій, розробці методів розв'язування вихідних рівнянь термopужності, єдиних для всієї кусково-однорідної області, питанням урахування у



термомеханіці скінченної швидкості поширення тепла, дослідженням термомеханічних процесів у тілах із залежними від температури характеристиками.

Моделювання та застосування інформаційних технологій у механіці та матеріалознавстві є одним із найперспективніших напрямів сучасної науки. Завдяки використанню чисельних методів, машинного навчання та комп'ютерного моделювання вдалося значно підвищити ефективність проєктування нових механічних конструкцій та матеріалів. Подальший розвиток цих технологій сприятиме створенню більш стійких, легких та економічно вигідних конструкцій, а також відкриє нові горизонти у фундаментальних дослідженнях та інженерній практиці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method. McGraw-Hill, 2000.
2. Anderson J. D. Computational Fluid Dynamics. McGraw-Hill, 1995.
3. Callister W. D. Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley, 2018.
4. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016.



Суглобов В.В.¹, Лаврик В.П.², Шишкін В.В.³

¹Декан факультету машинобудування та зварювання, д-р техн. наук, професор, ДВНЗ
“Приазовський державний технічний університет”, м. Дніпро, Україна,
suglobov_v_v@pstu.edu

²Завідувач кафедри підіймно-транспортних машин і деталей машин, канд. техн.
наук, доцент, ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”, м. Дніпро,
Україна, lavrik_v_p@pstu.edu

³Доцент кафедри підіймно-транспортних машин і деталей машин, канд. техн. наук,
доцент, ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”,
м.Дніпро, Україна, shishkin_v_v@pstu.edu

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ

Анотація. Досліджено напружено-деформований стан металевих конструкцій порталного крану. Дослідження проведено на базі кінцево-елементних моделей, створених за допомогою спеціальних програмних комплексів. Для аналізу навантаження елементів металоконструкції крана отримано загальну картину його напружено-деформованого стану шляхом створення тривимірної розрахункової моделі із застосуванням сучасних CAD/CAE систем

Ключові слова: порталний кран, металоконструкції, напружено-деформований стан

Вступ. Несучі металоконструкції порталних кранів є найбільш металомісткими і такими, що в переважній більшості визначають кінцеву вартість крана. Під час проектування багато уваги приділяється режимам навантаження і дотриманню вимог щодо жорсткості, втомної та статичної міцності.

Матеріал досліджень. Сучасні CAD/CAE системи ще на початкових стадіях розробки дозволяють здійснювати оптимальне проектування металевих конструкцій, що дозволяє знаходити кращі конструктивні варіанти, а в процесі експлуатації застосовувати найбільш раціональні варіанти ремонтів і посилення. Актуальним завданням та значною проблемою є удосконалення складних кінцево-елементних моделей. Разом з цим, використання топологічної оптимізації під час проектування є



щодо новим компонентом. Зазвичай виділять три основні методики розрахунків металевих конструкцій кранів:

- 1) за допустимою напругою;
- 2) система імовірнісних розрахунків;
- 3) за граничними станами.

Виділяють також метод кінцевих елементів (МКЕ), який доцільно застосовувати для виконання аналізу напружено-деформованого стану просторових конструкцій, які мають у своїй конструкції багато елементів. МКЕ - це сучасний чисельний метод розв'язання диференціальних рівнянь. Він широко застосовується для вирішення завдань механіки руйнування та деформованого твердого тіла, розрахунках та аналізі напруженодеформованого стану металокопудрукції вантажопідйомних машин. Також він досить часто застосовується для вирішення завдань оптимізації копудрукцій деталей машин, елементів металокопудрукцій. Широке поширення МКЕ набув завдяки значному розвитку CAD/CAE систем.

На кафедрі підйомно-транспортних машин та деталей машин ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» протягом останніх років вирішено багато важливих завдань проектування елементів металокопудрукцій та обладнання порталних кранів, зменшення рівня напруженості елементів металокопудрукції, структурно-параметричного синтезу Під час виконання зазначених завдань використовувався МКЕ із застосуванням сучасних CAD/CAE систем. Переважно на сьогодні в проектуванні металокопудрукцій, зокрема при їх розрахунку на міцність, використовуються програмні комплекси, такі як NX, Ansys, Nastran, SCAD, Solid Works, Ліра та інші. Усі вони у своїй основі реалізують класичні методи розрахунку копудрукцій з урахуванням МКЕ. Більшого застосування вони отримали з розвитком обчислювальної техніки. Також, на підприємствах використовуються CALSсистеми, які дають можливість автоматизувати процеси, пов'язані з життєвим циклом виробу, який включає в себе етапи та стадії проектування, підготовку та безпосередньо виробництво, експлуатацію виробу та його подальшу утилізацію по завершенню експлуатації.

Неможливо уявити пошук найбільш навантаженої ділянки або вузла металокопудрукції, що визначає її надійність, без якісного аналізу напружено-деформованого стану всієї системи та чіткого розуміння фізичних процесів, що відбуваються під час роботи копудрукції. У цей час стає можливим пошук деякої структури, внаслідок чого має бути отримана оптимальна форма та геометричні параметри кожного з її елементів у межах заданого рівня напруженості.



Дослідження напружено-деформованого стану металоконструкції порталного крану виконувалось на твердотільній моделі, що деформується, з використанням сучасних CAD/CAM/CAE систем. Аналіз відомостей дефектів та виконаних ремонтів показав, що зміни (кількість та геометричні параметри) до несучих елементів металоконструкцій порталного крану «Сокіл» не вносилися. Виконані ремонти мали відновлювальний характер, що дозволило побудувати модель металоконструкції відповідно до креслень заводу-виробника.

Виконувалося моделювання різних варіантів навантаження крана.

Основою пошуку найбільш уразливої частини металоконструкції, що визначає її надійність, слід вважати якісний аналіз напружено-деформованого стану несучої системи, який найбільше доцільно проводити на базі кінцево-елементних моделей, створених за допомогою спеціальних програмних комплексів.

У твердотільній моделі реалізовані основні несучі елементи металоконструкції, які шарнірно пов'язані між собою, що відповідає реальному об'єкту. Для реалізації методу кінцевих елементів на основі моделі, що твердотливо-деформується, була побудована сітка кінцевих елементів. Для розрахункових моделей як опору конструкції застосовувалися шарнірна та жорстка загортання колони, жорстке кріплення крана за ходові колеса.

Для моделювання навантаженого стану металоконструкції розрахункові навантаження та їх комбінації приймалися та розраховувалися відповідно до норм розрахунку металоконструкцій порталних кранів.

Для наочного виявлення найбільш навантажених елементів металоконструкції з рівнем напруги до 40 МПа було застосовано інструмент «Обмеження ISO», прийнявши як граничне значення еквівалентних напруг 40 МПа.

Результати досліджень. В результаті досліджень встановлено міста, де локально сконцентровані максимальні напруги. Це:

1. Хобот в місті кріплення шарніру з'єднання зі стрілою.
2. Місто кріплення шарніру коромисла противаги.
3. Місто кріплення механізму зміни вильоту стріли.
4. Місто на колоні під шарніром кріплення стріли і шарнір кріплення стріли до колони.
5. Місто кріплення опорних катков колони з боку стріли.

Розроблено рекомендації по посиленню найбільш небезпечних міст металевих конструкцій порталного крану.



Етері Гарт¹, Олександр Шебанов²

¹професор, доктор фізико-математичних наук, професор, ДНУ ім. О. Гончара, Дніпро,

Україна, hart@ua.fm

²аспірант, ДНУ ім. О. Гончара, Дніпро, Україна, alexander.shebanov@gmail.com

ВПЛИВ РОЗТАШУВАННЯ ТА ОРІЄНТАЦІЇ ЕЛІПТИЧНИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ НАВКОЛО КРУГОВОГО ОТВОРУ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ

Досліджено напружено-деформований стан тонкостінної циліндричної оболонки з круговим отвором і розташованими навколо нього еліптичними включеннями з іншого матеріалу. Розглянуто різні варіанти сполучення матеріалів матриці і включень та конфігурації їх розташування: два та чотири включення під кутом 45° відносно координатних осей. Проаналізовано особливості впливу включень в залежності від їх кількості, орієнтації, способу розташування та механічних властивостей на коефіцієнт концентрації напружень біля отвору. Проведено порівняльний аналіз із результатами аналогічних задач для пластин.

Ключові слова: циліндрична оболонка; круговий отвір; еліптичні включення; напруженодеформований стан; коефіцієнт концентрації напружень; метод скінченних елементів.

Тонкостінні конструкції, елементами яких є пластини та оболонки, застосовуються у різних сферах техніки, таких як ракетна інженерія, авіабудування, енергетика тощо. Унаслідок технологічних або конструктивних особливостей цілісність матеріалу конструкції нерідко порушується через наявність отворів і включень різного походження, що впливає на розподіл напружень, а також на процеси деформування й руйнування системи. Одним із ключових завдань механіки деформівного твердого тіла є аналіз впливу локальних концентраторів напружень на напружено-деформований стан тонкостінних елементів конструкцій, а також пошук способів зменшення концентрації напружень. На відміну від аналітичних методів, використання яких можливе для обмеженого класу задач, застосування числових методів є значно універсальнішим та ефективнішим.



За допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) знайдено коефіцієнт концентрації напружень (ККН) для циліндричних оболонок з круговим отвором, оточеним двома та чотирма еліптичними включеннями, розташованими під кутом 45° до координатних осей Ox і Oy . Для зручності аналізу введено коефіцієнт відносної жорсткості включення k ($k = E / E_0$, де E – модуль пружності включення, E_0 – модуль пружності оболонки). Розрахунки проведені для «жорстких» ($k > 1$) та «м'яких» ($k < 1$) включень та декількох варіантів відстані l між центром кругового отвору радіусу r та геометричним центром еліптичного включення ($l=8r; 5r; 3r; 2,5r$).

У випадку використання двох «жорстких» включень найраціональнішою з точки зору зменшення величини ККН виявилась конфігурація із розташуванням включень на найближчій із розглянутих до отвору відстані ($l=2,5r$). Це дало змогу знизити ККН на $\sim 10\%$ порівняно з оболонкою без включень [3] (табл. 1). Крім того, виявлено механічний ефект: зі зближенням з отвором «жорстких» включень, розташованих під кутом 45° до координатних осей Ox і Oy , відбувається зміна локації зон концентрації напружень у напрямку, протилежному розташуванню включень (за годинниковою стрілкою). У разі використання двох «м'яких» включень величина ККН, навпаки, зростає від $\sim 4\%$ до $\sim 14\%$. Тут також спостерігається механічний ефект зсуву, але зміна локації зон концентрації напружень відбувається в протилежному напрямку (проти годинникової стрілки). Одержані результати добре узгоджуються за якісними та кількісними показниками із результатами аналогічної задачі для пластини [1].

У випадку наявності в оболонці чотирьох «жорстких» включень, розташованих під кутом 45° , спостерігається зниження концентрацій напружень порівняно з оболонкою без включень. Зазначимо, що у разі зменшення відстані між отвором і включеннями величина ККН зменшується (рис. 1). Найкращий результат отримаємо на найближчій до отвору відстані ($l=2,5r$). При цьому величину ККН вдається зменшити на $\sim 26\%$.

Як і у випадку з двома «м'якими» включеннями, використання чотирьох «м'яких» включень призводить до зростання ККН (від $\sim 8\%$ до $\sim 25\%$) (табл. 1).



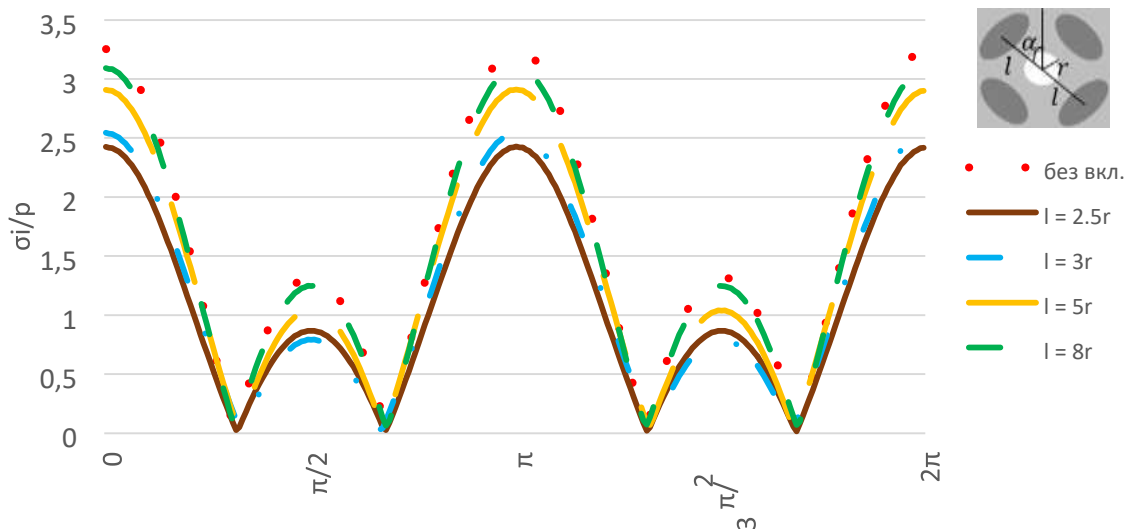


Рисунок 1 – Розподіл напружень вздовж розгортки контуру отвору у разі використання чотирьох «жорстких» включень

Таблиця 1 – Порівняння ККН оболонки з отвором і включеннями

Задача Відстань, l	Два включення під кутом 45° до осей Ox і Oy				Чотири включення під кутом 45° до осей Ox і Oy			
	$k > 1$		$k < 1$		$k > 1$		$k < 1$	
	ККН	Δ , %	ККН	Δ , %	ККН	Δ , %	ККН	Δ , %
$8r$	3,16	-2,8	3,38	+3,9	3,09	-4,9	3,52	+8,1
$5r$	3,08	-5,4	3,47	+6,8	2,91	-10,6	3,70	+13,8
$3r$	2,94	-9,7	3,68	+13,0	2,54	-21,8	4,06	+24,8
$2,5r$	2,92	-10,3	3,72	+14,4	2,43	-25,5	4,07	+24,9

Тут Δ – відхилення ККН циліндричної оболонки з малим круговим отвором і еліптичними включеннями від ККН для оболонки без включень [3].

Таким чином, проведений скінченноелементний аналіз комп'ютерного моделювання поведінки структурно неоднорідної циліндричної оболонки з круговим отвором за наявності еліптичних включень свідчить про суттєвий вплив механічних властивостей включень, їх кількості і способу розташування на величину ККН біля отвору. Найкращим з точки зору зниження концентрації напружень виявився варіант розташування чотирьох «жорстких» включень на найближчій до отвору відстані, що дало змогу зменшити величину ККН на $\sim 26\%$.

Ці результати добре узгоджуються із результатами для аналогічної задачі для пластин [2].



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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гарт, Е. Л. & Рибалко, Я. В. (2019). Взаємовплив кругового отвору і оточуючих його еліптичних включень при пружному деформуванні прямокутної пластини. Проблеми обчислювальної механіки і міцності: зб. Наук.праць Ліра, Дніпро, (30), 5–18. <https://doi.org/10.15421/4219023>
2. Гарт, Е. Л. & Шебанов, О. Д. (2024). Вплив параметрів симетрично розташованих еліптичних включень на концентрацію напружень навколо кругового отвору в циліндричній оболонці. Проблеми обчислювальної механіки і міцності: зб. Наук.праць Ліра, Дніпро, ((38), 36–50. <https://doi.org/10.15421/4224103>
3. Гузь, О. М., Чернишенко, І. С., Чехов, Вал. Н. & ін. Методи розрахунку оболонок: 5 т. Т. 1. Теорія тонких оболонок, послаблених отворів. (1980). Наук. думка, Київ.



Е. Л. Гарт¹, Б. І. Терьохін²

¹ *професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки, доктор фізико-математичних наук, професор, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна, e-mail: hart@ua.fm*

² *молодший науковий співробітник, доктор філософії, Інститут технічної механіки*

Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпро, Україна, e-mail: bogdan.teryokhin@gmail.com

ПРО КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ У ТОНКИХ ПЛАСТИНАХ І ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНКАХ З КВАДРАТНИМ ОТВОРОМ, ОТОЧЕНИМ ВКЛЮЧЕННЯМ ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНОГО МАТЕРІАЛУ

Проведено числове дослідження поведінки тонких пластинок та тонкостінних циліндричних оболонок з квадратним отвором і радіально неоднорідним включенням, проаналізовано вплив характеру зміни модуля пружності включення та його ширини на коефіцієнт концентрації напружень (ККН) навколо отвору. Встановлено раціональні параметри включення із функціональноградієнтного матеріалу, що дають змогу отримати механічний ефект: зменшення ККН та відповідних деформацій до ~ 70 %.

Ключові слова: тонка пружна пластина; циліндрична оболонка; квадратний отвір; кільцеве включення; функціонально-градієнтний матеріал; напружено-деформований стан; коефіцієнт концентрації напружень; скінченноелементний аналіз.

Сучасний розвиток машинобудування, авіаційно-космічної техніки, енергетики, медичної техніки та багатьох інших галузей вимагає створення нових матеріалів з унікальними властивостями, що задовольняють часто суперечливі вимоги до функціональних характеристик виробів. Наприклад, авіаційна техніка потребує поєднання міцності та легкості, металорізальний інструмент – твердості та пластичності, а електронні компоненти – мініатюрності та високої ємності. Ці задачі успішно можна вирішити завдяки розробці функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ), які є новим поколінням композитних матеріалів.

Для ФГМ характерна відсутність чітких меж між компонентами та безперервна просторова зміна (градієнт) фізико-механічних властивостей. Концепція створення ФГМ полягає у визначенні сукупності властивостей, необхідних для виконання заданих



функцій, закономірностей їх просторового розподілу та одержанні такого градієнта структур, складів і властивостей компонентів, який дозволив би знизити концентрацію внутрішніх напружень [1] і збільшити ресурс роботи матеріалу відповідно до висунутих експлуатаційних вимог.

Застосування ФГМ у вигляді включень в тонкостінних конструкціях з отворами дає змогу зменшити коефіцієнт концентрації напружень (ККН) в їх околі [2, 3]. Важливим завданням у механіці деформівного твердого тіла є встановлення раціональних параметрів таких включень.

У цій роботі на основі методу скінченних елементів (МСЕ) проведено комп'ютерне моделювання поведінки тонкої ізотропної однорідної прямокутної пластини розмірами $a \times b$ та тонкостінної циліндричної оболонки довжини L , діаметру d з центрально розташованим квадратним отвором зі стороною $2c$ та радіально-неоднорідним включенням радіусу R_1 за дії одновісного рівномірного розтягувального навантаження $p = \text{const}$, що не призводить до появи пластичних деформацій. Вважалося, що включення змодельовано вставкою, яка розташована у площині пластини/оболонки і має однакову з нею товщину; на границі включення із матрицею задано умови жорсткого зчеплення. Задля отримання практичної збіжності числових розв'язків при використанні МСЕ застосовано заокруглення кутів квадратного отвору з радіусом заокруглення $0,08c$.

У числових розрахунках вибрано модельні матеріали з коефіцієнтом Пуассона $\nu_0 = 0,25$ та змінним модулем пружності ФГМ-включення. Як показано у [2], для зниження концентрації напружень доцільно використовувати закон зміни модуля пружності ФГМ-включення з трьома характерними зонами: 1) зона зростання, ширини h_1 ; 2) зона незмінного (фіксованого) значення, ширини h_2 ; 3) зона зменшення модуля пружності, ширини h_3 . Для визначеності у розрахунках прийнято, що модуль пружності пластини/оболонки $E_0 = 100 \text{ ГПа}$; коефіцієнт відносної жорсткості ФГМ-включення $k = 2, 3, 4$ (k – відношення модуля пружності E_2 ($E_{\text{max}}^{\text{вкл}}$) другої зони ФГМ-включення до модуля пружності пластини/оболонки E_0). Ширину ФГМ-включення варіювали: $h_{\text{вкл}} = 3c, 4, \dots, 9c$ ($h_1 = 3c, h_2 = c, 2, \dots, 7c$).

Результати проведених числових розрахунків показали, що використання ФГМвключень в пластині та циліндричній оболонці з квадратним отвором призводить до зменшення величини ККН в околі отвору і максимальних деформацій до $\sim 70 \%$. Збільшення коефіцієнта відносної жорсткості ФГМ-включення k та ширини другої зони ФГМ-включення h_2 призводить до зменшення величини ККН і відповідних деформацій.



Порівняльний аналіз одержаних результатів для випадку наявності в пластині ФГМ-включення із відповідними результатами для пластини за наявності однорідних включень показав значні переваги застосування саме ФГМ-включень: спостерігається механічний ефект зменшення як інтенсивності напружень, так і інтенсивності деформацій в зоні концентрації параметрів напружено-деформованого стану. У разі застосування однорідних включень такого ефекту не відбувається. Для оболонок отримано аналогічні закономірності.

Таким чином, у результаті проведеного числового дослідження поведінки тонких пластин та циліндричних оболонок з квадратним отвором і радіально-неоднорідним включенням проаналізовано вплив зміни величини модуля пружності ФГМ-включення та його ширини на ККН в пластині та оболонці. Знайдено раціональні параметри радіальнонеоднорідного ФГМ-включення, у разі використання якого вдається отримати механічний ефект: зменшення ККН і відповідних деформацій на $\sim 70\%$. Встановлено, що наявність ФГМ-включень з певними механічними властивостями і геометричними параметрами дозволяє впливати не тільки на величину ККН в пластинчато-оболонкових елементах конструкцій поблизу локальних концентраторів напружень, а й на розподіл напружень по їх поверхні. Така особливість ФГМ-включень дає змогу уникати стрибків напружень, особливо на стику включення з матрицею пластини/оболонки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Peterson, R. F. (1974). *Stress concentration factors*. Wiley.
2. Hudramovich, V. S., Hart, E. L., & Terokhin B. I. (2024). Stress concentration around a circular hole in thin plates and cylindrical shells with a radially inhomogeneous inclusion. *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods. Advanced Structured Materials: Collected work*. Springer, Cham, (2024), Chapter 18, 249–264.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-54063-9_18
3. Yang, Q., Cao, H., Tang, Y., Li, Y., & Chen, X. (2021). Experimental investigation of stress distributions in 3D printed graded plates with a circular hole. *Materials*, 14(24), 7845. <https://doi.org/10.3390/ma14247845>



Костянтин Бурласенко¹, В'ячеслав Бурласенко²

¹студент, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків,

Україна, email: burlayenko2025mf11@student.karazin.ua

²канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: burlayenko@yahoo.com

АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕРІВНОМІРНОЇ ГЕОМЕТРІЇ КОМПОЗИТНОЇ БАЛКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЇЇ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ

Анотація. Аналізуються власні коливання балок змінного перерізу з метою накопичення даних для оптимізації їхньої форми під час проєктування. Розроблено уніфіковану методику аналітичного опису змінної геометрії балки у вигляді конічних кривих. Вона дозволяє визначати власні частоти та форми коливань, використовуючи метод диференціального перетворення. Такий підхід дозволяє комплексно враховувати вплив геометричних змін балки на її поведінку в автоматизованому середовищі.

Ключові слова: балка змінного перерізу; раціональні криві Безьє; базис Гребнера; метод диференціального перетворення; власні коливання; композитна балка з металевою матрицею.

Вступ. Балки змінного перерізу широко застосовуються в техніці завдяки можливості оптимізації їхньої форми під специфічні вимоги [1,2]. Однак складність їхнього структурного аналізу може ускладнювати досягнення ефективних оптимізаційних результатів. Це особливо важливо під час проєктування елементів динамічних систем, де оптимальна геометрія визначається з урахуванням власних частот і форм коливань [3]. Для забезпечення безперервного взаємозв'язку між геометрією балки та її динамічними характеристиками необхідна інтеграція проєктування та аналізу в автоматизованому середовищі. Одним із найпоширеніших інструментів для інтегрованого проєктування та аналізу є метод скінченних елементів (МСЕ) [4]. Проте для довгих, вузьких балок цей метод може бути обчислювально затратним, що зумовлює необхідність розробки більш ефективних підходів до розрахунку.

У цій роботі запропоновано підхід до визначення власних частот і форм коливань одновимірних композиційних балок змінного перерізу. Метод ґрунтується на



напіваналітичному методі диференціального перетворення (МДП) [5], інтегрованому з аналітичною процедурою формування геометрії у вигляді конічних перерізів. Отримані результати слугуватимуть основою для оптимізації форми балки через аналіз її власних коливань.

Матеріал і результати досліджень. Розглянемо плоску композитну балку довжиною L , симетричну відносно своєї середньої лінії з лівим кінцем, розташованим у початку координатної системи. Нехай прямокутний переріз балки змінюється вздовж її довжини відповідно до закону конічної кривої, яка описується алгебраїчним квадратним рівнянням:

$$Ax^2 + Bxy + Cx^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (1)$$

Для зручності застосування МДП цю криву доцільно подати у вигляді квадратичної раціональної кривої Безьє, яка визначається контрольними точками

$P_0(x_0; y_0)$, $P_1(x_1; y_1)$, $P_2(x_2; y_2)$ та вагою $w_1 = \frac{l_e}{l_f - l_e}$, як проілюстровано на рис. 1.

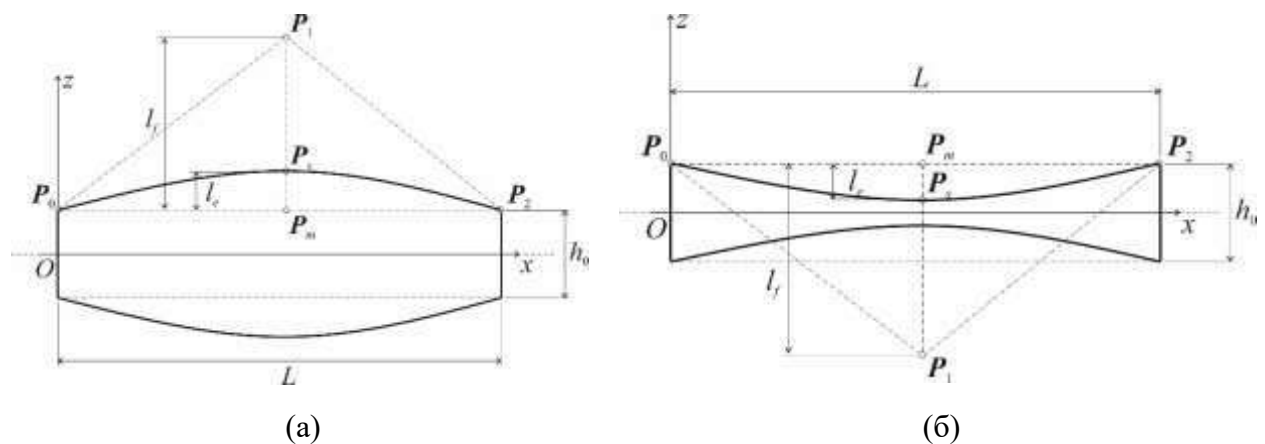


Рисунок 1 – Геометричні конфігурації балок зі змінним перерізом: (а) опукла форма; (б) увігнута форма.

У базисі Гребнера коефіцієнти рівняння (1) виражаються через координати контрольних точок і вагового коефіцієнту відповідно до формул, наведених у [6].

Окрім зазначених вище форм балок, відповідний вибір контрольних точок і вагового коефіцієнта кривої Безьє дає змогу аналітично проєктувати балки зі складнішою геометрією, зокрема з усіченими кінцями, як показано на рис. 2.



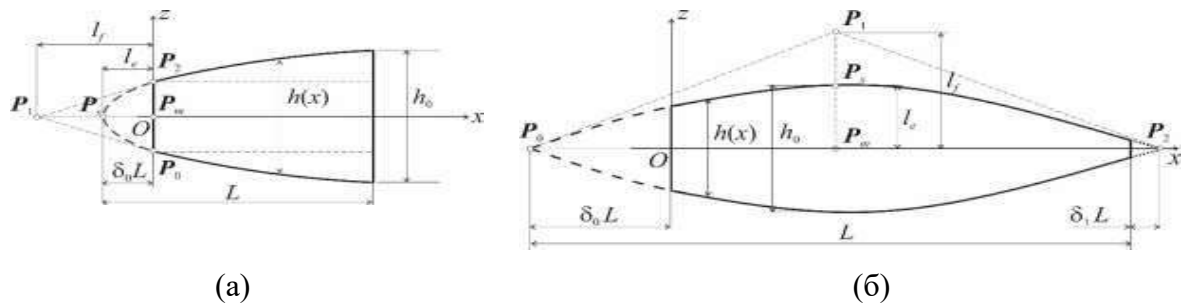


Рисунок 2 – Геометрія балок параболічної форми із усіченим лівим кінцем: (а) гілки параболі спрямовані вправо; (б) гілки параболі спрямовані вниз.

Опис поперечних коливань композитної балки з металевою матрицею та змінним поперечним перерізом (рис. 1 і 2) ґрунтується на теорії балки Тимошенка. Змінні коефіцієнти, що враховують залежність геометрії перерізу та/або матеріальних властивостей від поздовжньої координати, взаємопов'язують диференціальні рівняння руху, що ускладнює їх аналітичний розв'язок [6]. Тому для розв'язку використовується напіваналітичний МДП.

Порівняння отриманих результатів із відомими даними, здобутими іншими методами для балок за різних граничних умов, підтверджує точність і ефективність запропонованої обчислювальної методики. Додатково проаналізовано добірку криволінійних балок однакової маси, яка охоплює як відомі, так і раніше не досліджені випадки. У результаті сформовано набір вхідних параметрів (форми балок) і вихідних даних (частоти коливань), придатних для використання в алгоритмі оптимізації.

Як приклад, у табл. 1 наведено порівняння перших чотирьох безрозмірних власних частот консольної композитної балки з параболічно звуженою висотою та постійною шириною. Балка усічена на лівому кінці та звужується до точки на правому кінці ($\delta_1 = 0$), як показано на рис. 2б.

Таблиця 1 – Безрозмірні власні частоти консольної композитної балки з параболічно звуженою висотою та постійною шириною.

δ_0 Mode	0.15			0.35			0.55		
	[2]	ДТМ	$\Delta^*, \%$	[2]	ДТМ	$\Delta^*, \%$	[2]	ДТМ	$\Delta^*, \%$
1	1.050	1.05057	0.05	3.070	3.06690	0.10	6.772	6.76070	0.17
2	7.606	7.58803	0.24	13.83	13.7831	0.34	24.65	24.5248	0.51
3	18.25	18.2256	0.13	30.54	30.3304	0.69	51.9	51.4115	0.94
4	32.54	31.9653	1.77	52.92	52.3541	1.07	88.34	87.0392	1.47



Аналіз показує, що порівнювані власні частоти демонструють високу точність узгодження.

Висновки. Нерівномірні балки, утворені конічними перерізами, описані аналітично за допомогою раціональних кривих Безьє у базисі Гребнера. Рівняння власних коливань сформульовано на основі припущень теорії балки Тимошенка. Матеріальні властивості композитної балки з металевою матрицею осереднені за законом суміші та можуть залишатися незмінними або змінюватися вздовж її довжини. Проведено порівняльний аналіз для підтвердження точності та оцінки ефективності запропонованої методики розрахунку. Розглянуті приклади охоплюють як відомі з літератури випадки, так і нові сценарії, зокрема криволінійні двоконусні балки. За результатами розрахунків сформовано набір вхідних параметрів (форми балок) і вихідних даних (частоти коливань), придатних для використання в алгоритмах оптимізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cucuzza, R., Rosso, M.M. & Marano, G.C. (2021). Optimal preliminary design of variable section beams criterion. SN Appl. Sci., 3, 745.
2. Caruntu, D.I. (2009). Dynamic modal characteristics of transverse vibrations of cantilevers of parabolic thickness. Mech. Res. Commun., 36, 391-404.
3. Seyranian, A.P., Lund, E., & Olhoff, N. (1994). Multiple eigenvalues in structural optimization problems. Structural Optimization, 8(4), 207–227.
4. Hoole, S.R.H., & Hoole, Y. (2019). Finite Elements-based Optimization. Boca Raton, CRC Press.
5. Pukhov, G.E. (1986). Differential transformations and mathematical modeling of physical processes. Kiev: Naukova Dumka.
6. Burlayenko, V. N., Kouhia, R., & Dimitrova, S. D. (2024). Free Vibration Analysis of Curvilinearly Tapered Axially Functionally Graded Material Beams. Applied Sciences, 14(15), 6446.



Мельник Сергій¹, Лобазов Сергій²

¹С.н.с., к.т.н., доцент, ІРЕ ім. Усікова НАНУ, Харків, Україна, e-mail:

melnyksergiy72@gmail.com

²С.н.с., ІРЕ ім. Усікова НАНУ, Харків, Україна, e-mail: labazov@ire.kharkov.ua

ОСОБЛИВОСТІ ВИХОРОВОЇ ДИНАМІКИ ПОТОКУ ПИЛОВИХ ЧАСТИНОК У ГАЗИФІКАТОРАХ

Анотація. Розроблено численну модель динаміки потоку пилових частинок, яка дозволяє вирішувати задачу оптимізації параметрів конструкції та режиму роботи газифікатора. Отримано аналітичні вирази для опису граничних умов взаємодії частинок зі стінками конструкції. Отримано обґрунтування ефекту «фокусування» частинок в області виходу повітряного потоку з інжектора.

Ключові слова: газифікатор, динаміка вихрових пилових потоків, фокусування.

Вступ. Для спалювання низькокалорійного вугілля або мусору використовують газифікатори різних конструкцій. При прольоті дрібного вугільного пилу, захопленого вихровими повітряними потоками, відбувається його часте або повне вигорання, яке підтримує високу температуру і швидкість вихідного потоку повітря. Для забезпечення максимальної ефективності такого газифікатора (тепла, одержаного на одиницю маси палива, що згоріло) необхідно знайти оптимальний динамічний режим згорання частинок вугільного пилу. Однак його параметри залежать від складної комбінації різних факторів, таких як властивості самих частинок, стан поверхні, специфічні особливості конструкції газифікатора та динаміки пилового потоку. Для її моделювання попередньо отримані аналітичні вирази для наближеного опису граничних умов прольоту частинок поблизу стінок. Чисельна модель динаміки, яка дозволяє оптимізувати параметри конструкції та режиму роботи газифікатора, представлена в іншій доповіді.

Конструкція газифікатора передбачає наявність як циліндричних, так і конусних поверхонь. Основними режимами руху частинок пилу є прольот разом із повітряним потоком, та ковзання по стінці. Перший із них описується класичними формулами, що запрограмовані у стандартному пакеті COMSOL Multiphysics (модуль – трасування частинок). Але для моделювання другого потрібні аналіз та розробка специфічних граничних умов ковзання та відриву частинок. Саме цьому присвячена ця доповідь.

1. Рух частинок по циліндричній стінці



Тангенціальна швидкість частинок, що рухаються циліндричною стінкою без відриву від неї, може бути розрахована за формулою:

$$v_{\varphi} = \left(\sqrt{2 \frac{u_{\varphi} + f \cos \beta \cdot u_r}{v^*} + 1} - 1 \right) \cdot v^* = \left(\sqrt{2 \frac{u_{\varphi}}{v^*} (1 + f \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma) + 1} - 1 \right) \cdot v^*, \quad (1)$$

де $v^* = \frac{1}{2f \cos \beta} \cdot \frac{r\eta}{m}$ або $v^* = \frac{1}{2f \cos \beta} \cdot \frac{rg}{\xi}$; $\operatorname{tg} \gamma = \frac{u_r}{u_{\varphi}}$; $\cos \beta = \frac{v_z}{v}$; f - коефіцієнт тертя частинок об стінку; u - швидкість повітряного потоку; v - швидкість частинок на стінці.

Для частинок, менших за 100 мкм $v^* \sim 60 - 1000 (m/s)$, що значно перевищує $u_{\varphi} \cong 14 (m/s)$, формулу (1) можна спростити:

$$v_{\varphi} \cong u_{\varphi} + f \cos \beta \cdot u_r \cong u_{\varphi}. \quad (1')$$

Тобто, практично всі частинки (за винятком найважчих) трохи відстають від повітряного потоку при ковзанні по стінці.

Кут нахилу спіральної траєкторії частинок, що рухаються циліндричною стінкою без відриву від неї, може бути розрахований за формулою:

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \alpha + \frac{\xi}{u_{\varphi}} \quad (2)$$

де $\xi = mg/\eta$ - характерна швидкість, яка залежить від маси частки, $\eta = 3\pi d\mu$, μ - динамічна в'язкість повітря; α - кут нахилу тангенціальної складової повітряного потоку; β - кут нахилу траєкторії частинки, що ковзає по стінці.

Критична умова відриву частинок, що рухаються циліндричною стінкою без відриву від неї, може бути розрахована за формулою:

$$m < \frac{r\eta u_r}{u_{\varphi}^2}; \text{ або } u_{\varphi} < \frac{gr}{\xi} \operatorname{tg} \gamma; \text{ або } \rho d^2 < \frac{18r\mu}{u_{\varphi}} \operatorname{tg} \gamma, \quad \text{де } \operatorname{tg} \gamma = \frac{u_r}{u_{\varphi}}. \quad (3)$$

2. Рух частинок по конічній стінці

Тангенціальна швидкість частинок, що рухаються конічною стінкою без відриву від неї, може бути розрахована як розв'язок квадратного рівняння:

$$u_{\varphi} - v_{\varphi} = f \cos \beta \cdot \xi \cdot \left(\frac{v_{\varphi}^2}{rg} \cos \theta + \sin \theta - \frac{u_n}{\xi} \right), \quad (4)$$

Записавши (4) як (1'), отримаємо:

$$v_{\varphi} \left(1 + \cos \theta \frac{v_{\varphi}}{2v^*} \right) = u_{\varphi} + f \cos \beta \cdot u_n \left(1 - \sin \theta \frac{\xi}{u_n} \right) \quad (4')$$

З урахуванням того, що u_n у конусній області близько 1,5 (м/с), а u_{φ} - близько 2,0 (м/с), а також нехтуючи $\left[\cos \theta \frac{v_{\varphi}}{2v^*} \right]$, отримаємо, як і для циліндричної поверхні, $v_{\varphi} \cong u_{\varphi}$.

Таким чином, час знаходження частинок на конусній поверхні визначається насамперед умовами відриву частинок, які проаналізовані нижче. У випадку, коли умови



відриву не досягаються для частинки, вона через деякий час осідає на стінці і потім обсіпається разом з іншими шарами, що «прилипли» до неї.

Критична умова відриву частинок, що рухаються конічною стінкою без відриву від неї, може бути розрахована за формулою:

$$m < \frac{r\eta(|u_r| - u_z \tan \theta)}{u_\varphi^2 + g \cdot \tan \theta}; \quad \text{або } u_\varphi < \frac{gr}{\xi} \cdot \frac{\tan \theta}{\cos \theta}; \quad \text{або } \rho d^2 < \frac{18r\mu}{u_\varphi} \cdot \frac{\tan \theta}{\cos \theta}, \quad (5)$$

де $u_n = (|u_r| \cos \theta - u_z \sin \theta)$; і ми нехтуємо прискоренням вільного падіння порівняно з доцентровим прискоренням, яке на 2 порядки більше.

Порівнюючи формули (3) і (5), бачимо, що збільшення кута нахилу конусної поверхні (до вертикалі) за тієї ж швидкості повітряного потоку робить критичну швидкість більше. Це забезпечує виконання умов відриву частинок більшого діаметра. Таким чином, перехід частинки на конусну поверхню супроводжується двома суттєвими змінами:

- за рахунок нормальної складової повітряного потоку деякі частинки, які не могли відірватися на циліндричній поверхні, відриваються (критичний діаметр збільшується в $\sqrt{1/\cos \theta}$ раз);
- частинки не опускаються по ній нижче, а накопичуються поблизу межі із наступною циліндричною або конусною поверхнею. Згодом частинки, що накопичилися і осіли на конічній стінці, обсіпаються нижче з нульовою початковою швидкістю.

3. Рух частинок, що падають зверху

Після першого зіткнення з конусною поверхнею частинки набувають радіальної складової швидкості і надалі рухаються по спіралі, взаємодіючи з повітряним потоком і стикаючись зі стінками. За рахунок відцентрової сили та в'язкого тертя їхня радіальна складова швидкості зменшується з кожним відскоком і вони притискаються до стінки газифікатора. Цей режим проявляється, як ефект «фокусування» пилу у цій області.

Час «притискання» частинок до циліндричної стінки можна оцінити за формулою:

$$t_\pi = \frac{|v_r|_0}{|u_r|} \cdot \frac{\xi}{g}, \quad (6)$$

де $|v_r|_0$ - початкове значення радіальної складової швидкості частинки, $|u_r|$ - середнє значення радіальної складової швидкості повітряного потоку, $\xi = mg/\eta$ (за цей час відхилення частинок від стінки зменшується у e раз).

Час «захоплення» частинок потоком повітря можна оцінити за формулою:

$$t_3 \approx m/\eta = \xi/g \quad (7)$$

Час падіння частинок на ділянці висоти h визначається як

$$t_\pi = \sqrt{2h/g} \quad \text{якщо} \quad t_\pi > t_3 \quad (8)$$

або часом проходження через область повітряного потоку якщо $t_\pi < t_3$.



Висновки. Одержано основні співвідношення руху пилових (вугільних) частинок у газифікаторі, що дозволяють проводити теоретичний аналіз режимів їх руху та вигорання, та оптимізувати роботу системи. Вони також доповнюють модуль «трасування частинок» у пакеті чисельного моделювання COMSOL Multiphysics.



Мельник Сергій¹, Лобазов Сергій²

¹С.н.с., к.т.н., доцент, ІРЕ ім. Усікова НАНУ, Харків, Україна, e-mail:

melnyksergiy72@gmail.com

²С.н.с., ІРЕ ім. Усікова НАНУ, Харків, Україна, e-mail: labazov@ire.kharkov.ua

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИХОРОВОЇ ДИНАМІКИ ПОТОКУ ПИЛОВИХ ЧАСТИНОК У ГАЗИФІКАТОРАХ

Анотація. Розроблено чисельну модель динаміки потоку пилових частинок, яка дозволяє вирішувати задачу оптимізації параметрів конструкції та режиму роботи газифікатора. Отримано обґрунтування ефекту «фокусування» частинок в області виходу повітряного потоку з інжектора.

Ключові слова: газифікатор, динаміка вихрових пилових потоків, фокусування потоку.

Вступ. Для спалювання низькокалорійного вугілля або сміття використовують газифікатори різних конструкцій. При прольоті дрібного вугільного пилу, захопленого вихровими повітряними потоками, відбувається його часткове або повне вигорання, яке підтримує високу температуру і швидкість вихідного потоку повітря. Для забезпечення максимальної ефективності такого газифікатора (тепла, одержаного на одиницю маси палива, що згоріло) необхідно знайти оптимальний динамічний режим згорання частинок вугільного пилу.

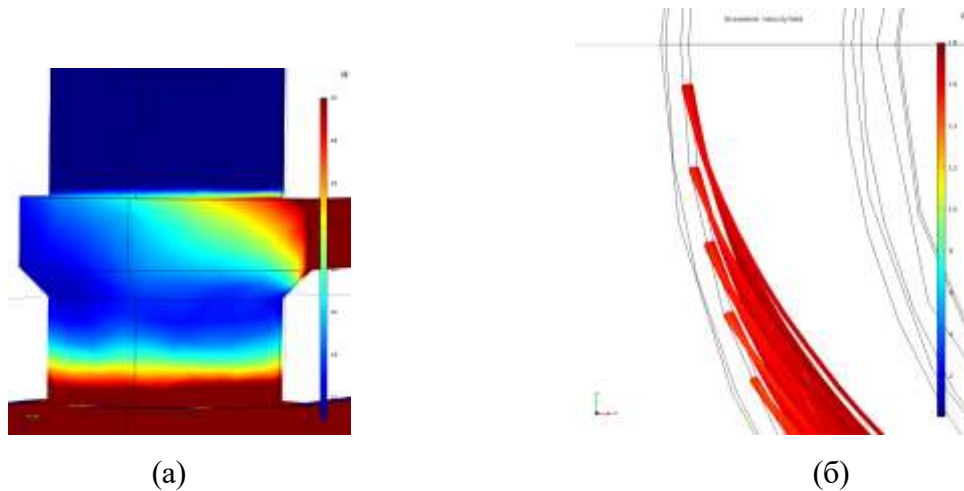
На основі COMSOL Multiphysics (модуль – трасування частинок) ми розробили чисельну модель динаміки потоку пилових частинок, у якій застосували аналітичні вирази специфічних граничних умов прольоту частинок поблизу стінок газифікатора (розглянуто в іншій доповіді цієї конференції).

1. Чисельний розрахунок швидкостей повітряного потоку був проведений в об'ємі та на стінках газифікатора із заданими розмірами та швидкостями вхідних потоків повітря з горизонтально розташованих інжекторів. Для розрахунку використано стандартний модуль для газодинамічних розрахунків пакету COMSOL Multiphysics. При розрахунку не враховувалося зворотний вплив частинок швидкості потоку.

Були проаналізовані такі властивості повітряного потоку, як розподіл в обсязі вертикальної, радіальної та тангенційної (вихрової) складових швидкості, а також розподіл тангенсу кута нахилу вектора швидкості на стінках газифікатора. На малюнку 1



показано ілюстрація характерних результатів розрахунку при довільному наборі параметрів потоку та геометричних розмірів газифікатора. Аналіз результатів дозволив розробити наближення при побудові аналітичної моделі руху частинок і встановити умови для розрахунку їх траєкторій у чисельній моделі.



Малюнок 1 – (а) Тангенціальная (вихревая) составляющая скорости в зоне инжектора потока; (б) - отрыв линий воздушного потока от цилиндрической поверхности.

2. Чисельний розрахунок руху частинок у робочій зоні газифікатора з огляду на наявність вимагає моделювання різних стадій руху частинок у різних зонах. Також окремого розгляду вимагають потоки частинок, що надходять зверху та додатково інжектуються. Такі параметри режиму роботи та конструкції, як швидкість вхідного потоку, розміри та нахил стінок газифікатора, розмір частинок та ступінь їх вигорання, що залежить від часу перебування в різних зонах і т.п. вимагають окремого аналізу та оптимізації.

Частки, що падають зверху, проходять стадії: вертикального падіння на початковій ділянці траєкторії; відбиття від конусного екрану; спіральне падіння з радіусом, що збільшується; притискання до циліндричної стінки робочої зони газифікатора. Частки, що інжектуються по дотичній в робочу зону, притискаються до стінки робочої зони газифікатора.

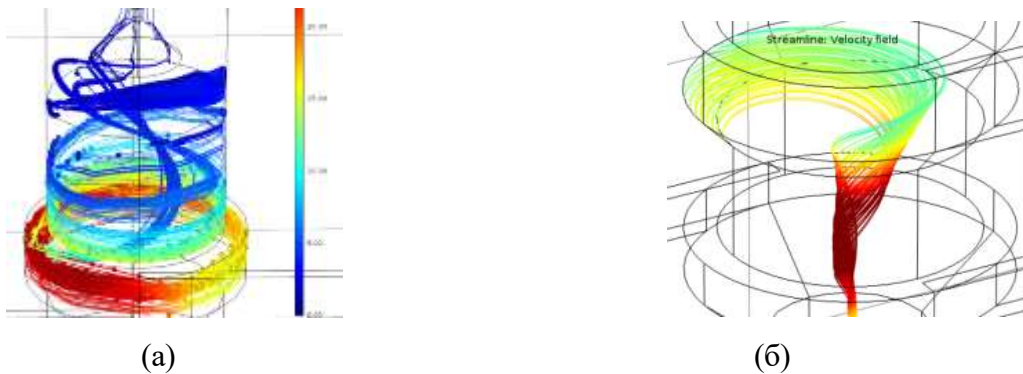
Подальші стадії руху частинок у потоці включають:

- Спіральний рух по циліндричній стінці з одночасною газифікацією та вигоранням (до 80%) маси частинки.
- Відрив частинки від стінки радіальним потоком повітря та її падіння у нижню область газифікатора чи розширювач.



- Можливе притискання частинок до циліндричної або конусної поверхні в різних галузях газифікатора в області сильного вихрового потоку
- ефект фокусування потоку частинок в областях з характерно неоднорідним розподілом тангенціальної швидкості потоку повітря.

На малюнку 2 показані ілюстрації деяких із понад десятка стадій, аналіз яких було проведено за допомогою розробленої моделі.



Малюнок 2 – (а) траєкторії польоту засипаних зверху частинок у циліндричній ділянці та розширювачі; (б) стадія відриву частинок та захоплення їх основним потоком при ковзанні по конусній поверхні.

3. Ефект "фокусування" частинок може виникати в області виходу повітряного потоку з інжектора. На кожному витку частинки, що рухаються в потоці або ковзають по стінці, потрапляють в область неоднорідних швидкостей. При їх обтіканні потоком повітря виникає сила Бернуллі, яка «втягує» їх у швидший потік. Виникає ефект «фокусування», в результаті якого частка, що опустилася під дією сил тяжіння на невелику відстань за 1 оборот, проходить через зону неоднорідності та отримує додатковий імпульс, що втягує її на колишню траєкторію. Це корисний ефект, який збільшує час знаходження частки у робочій зоні та сприяє її повному вигорянню.

Висновки. Априорно обрані параметри конструкції забезпечує повне вигорання і висипання частинок, що вигоріли, з діаметром не більше 100 мікрон у верхній зоні або у вихрових зонах. Для повного вигорання більш важких частинок необхідно збільшити висоту циліндричних зон вигорання або кількість розширювачів. Для збільшення продуктивності потрібно збільшення розмірів конструкції чи вхідних швидкостей потоку повітря в інжекторах. При цьому відповідно збільшиться як кількість (маса) вугільного пилу, що знаходиться в газифікаторі в стаціонарному робочому режимі, так і його пропускна здатність. Вплив на характеристики повітряного потоку пилової хмари

частинок, що рухається в ньому, невеликий, так як за оцінками більшість частинок дуже швидко захоплюються потоком і рухаються з ним практично як одне ціле.

Аналіз руху частинок конусної поверхні показує, що її кут нахилу і ширина не надають істотного впливу на характер руху. Частинки накопичуються на максимальному радіусі (границя із циліндричною поверхнею) під дією відцентрової сили, і обертаються там до повного вигорання або відриву від поверхні. Умови відриву можна поліпшити, збільшивши кут нахилу конусної поверхні до вертикалі. У той самий час геометричні параметри поверхні можуть сильно впливати на характер динаміки повітряного потоку.



Біляєв М.М.¹, Семененко П.В.²

¹ завідувачий кафедри докт. техн. наук, проф., «Гідравліка,
водопостачання та фізика»,

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський
інститут інфраструктури і транспорту», Дніпро, Україна, e-mail:

biliaiev.m@gmail.com

² старший науковий співробітник, канд. техн. наук. Державне
підприємство

«конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпро Україна,

e-mail: semenenkopv1981@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ В ОБ'ЄМІ ГОЛОВНОГО ОБТІЧНИКА

Анотація. На етапі передстартової підготовки необхідно виконати жорсткі умови щодо умов навколишнього середовища всередині головного обтічника, де знаходиться космічний апарат. Дуже важливо передбачити концентрацію пилу біля поверхонь космічного апарата під час примусової вентиляції. Постає актуальна науково-технічна задача – моделювання прогнозованого рівня пилового забруднення повітря на визначених особливо «чутливих» поверхнях.

Ключові слова: пилове забруднення; космічний апарат; головний обтічник; математичне моделювання

Вступ. У головному обтічнику ракети-носія розташовується космічний апарат. Для забезпечення умов безпечного перебування космічного апарата потрібно постійне термостатування повітрям головного обтічника [1–4]. Також треба зазначити що вітчизняні вчені В. І. Тимошенко, В. М. Сіренко та інші ще в наприкінці другого тисячоліття досліджували питання безпечного перебування космічного апарата в об'ємі головного обтічника [5]. Тривала вентиляція може призвести до забруднення пилом чутливих поверхонь космічного апарата. Особливо чутливими поверхнями супутника є: сонячні батареї, оптичні інструменти, рефлектори передавачів сигналів та чутливі сенсорні елементи. Тому, важливим, практичним завданням є прогнозування рівня пилового забруднення супутника всередині головного обтічника під час його примусової



вентиляції. Особливо важливим можна вважати визначення зон, де може бути небезпечне накопичення пилу.

Матеріал і результати досліджень. Для рішення цієї задачі використанні математичні моделі [6, 7]. Проведення експерименту для реального об'єкту практично неможливо. Коли супутник вже встановлено це не дозволяє «втручання» в середину обтічника (внесення якісь додаткових детекторів, вимірювальної апаратури тощо). Тому, створення науково обґрунтованих математичних моделей для прогнозування пилового режиму всередині обтічника є важливою прикладною задачею.

Для прогнозування пилового режиму головного обтічника ракети-носія розроблена чисельна модель. Моделюючи рівняння:

- рівняння масопереносу пилу (враховує перенос пилу за рахунок конвекції, дифузії та гравітаційного осадження);
- рівняння для потенціалу швидкості (визначення поля швидкості повітряного потоку при обтіканні супутника в головному обтічнику);
- емпіричні залежності, що допомагають визначити інтенсивність осадження пилу на поверхню супутника.

Представлено результати чисельних експериментів, які були проведені з використанням розроблених чисельних моделей, для двох сценаріїв. Обчислювальні експерименти проводилися для супутників всередині головного обтічника ракети-носія CYCLONE-IV. Розглянуто два випадки, коли супутник, що розташований всередині обтічника, має складну геометричну форму. Розміри головного обтічника цієї ракетиносія становили $4,99\text{м} \times 4\text{м}$ (двовимірний модель). На верхній межі розрахункової області задавався рівномірний потік повітря зі швидкістю 2м/с . Діаметр частинок пилу, які потрапляють в основний обтічник, становив 7мкм . Концентрація пилу в потоці повітря, який використовувався для примусової вентиляції, становила 2000 частинок/м^3 .

Результати чисельного експерименту показують, що геометрична форма супутника суттєво впливає на розподіл пилу всередині головного обтічника. Зона інтенсивного пилового забруднення, для обох сценаріїв, формується у верхній частині супутника, тобто біля отвору крізь який потрапляє повітря всередину обтічника. Це обумовлено різким гальмуванням повітряного потоку коли він взаємодіє зі супутником.

Науковою новизною можна вважати розроблену багатофакторну чисельну модель для аналізу пилового забруднення обтічника при примусовій його вентиляції на етапі термостатування. Модель дає можливість здійснювати рішення задачі газової динаміки



та масопереносу в областях, що мають складну геометричну форму. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь використані кінцево-різницеві схеми.

Розроблено швидкодіючу чисельну модель для прогнозування пилового забруднення головного обтічника ракети-носія під час його примусової вентиляції. Запропонована чисельна модель дозволяє врахувати основні фізичні фактори, які впливають на розподіл пилу в головному обтічнику під час примусової вентиляції. Розроблена комп'ютерна програма дозволяє проводити обчислювальні розрахунки за короткий час. Ця комп'ютерна програма може бути використана для первинної оцінки пилового режиму в головному обтічнику на етапі його примусової вентиляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Francisco, J. T. Вентиляція відсіків - Критерії проектування космічних апаратів.
NASA-SP-8060. 1970, 31 р. Доступно за посиланням:
<https://ntrs.nasa.gov/citations/19710018690>
2. Посібник користувача Falcon. Space Exploration Technologies Corp.
Доступно за посиланням: <https://cutt.ly/WettMMIly>
3. Кашанов, А.Е., Дегтярьов, А.В., Гладкий, Е.Г., Баранов, Є.Ю. Оцінка технічних ризиків при пуску ракети-носія "Дніпро", *Авіаційно-космічна техніка і технологія* 5 (92), 2012. – С. 113-117.
4. Посібник користувача ракети-носія Ariane 5. 2016. Доступно за посиланням:
<https://surli.cc/xbblws>
5. Timoshenko, V. I, Agarkov, A. V, Moshnenko, Ju. I, Sirenko, V. N, Knyshenko, Ju. V, Ljashenko, Ju. G. (1999). Problemy termostatirovaniya i obespecheniya sohrannosti kosmicheskogo apparata v period predstartovoj podgotovki i pri vyvedenii na orbitu. *Kosmichna nauka i tehnologija*, 5, 5/6, 56-64.
6. Біляєв, М., Біляєва, В., Русакова, Т., Козачина, В.А., Берлов, О., Семененко, П., Козачина, В.В., Бразалук, І., Клим, В., Татарко, Л. Розробка методу оцінки запиленості повітря в головному обтічнику ракети-носія, *Східно-Європейський журнал передових технологій* 5/1(119), 2022. – С. 17-25. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.266013
7. Чисельне моделювання поширення забруднення в навколишньому середовищі [Текст] / М. З. Згуровський, В. В. Скопечкий, В. К. Хрущ, М. М. Беляєв. - К.: Наук.думка, 1997. - 368 с.



Бутринський Дмитро¹, Бутринський Ігор²

¹аспірант, НУ «Львівська політехніка», Львів, Україна, e-mail:

dmytro.i.butrynskyi@lpnu.ua

²доцент, к.т.н., доцент, НУ «Львівська політехніка», Львів, Україна, e-mail:

igor.z.butrynskyi@lpnu.ua

ДИНАМІКА СТАЛЕВОГО КАНАТУ ПЕРЕДДЕТОНАЦІЙНОГО ЕКРАНУ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ УДАРІ

Анотація. Розглядається поперечний удар циліндричного тіла об сталевий канат сітки перед детонаційного екрану. Задача розв'язується чисельно на основі методу скінченних елементів з інтегруванням нелінійних рівнянь руху явним методом. На основі чисельного розв'язку досліджено параметри ударної взаємодії, хвилі деформацій і зусилля у канаті та опорній конструкції, необхідні для встановлення необхідної проєктної несучої здатності канату. Подаються напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: поперечний удар, сталевий канат, нелінійна динаміка, метод скінченних елементів.

Пасивні екрани знаходять застосування як елемент захисту техніки, захисних споруд, об'єктів критичної інфраструктури. Основним завданням екрану є сприйняття кінетичної енергії рухомої маси у мірі, достатній для забезпечення необхідної дистанції від точки вибуху до захищуваного елемента та уникнення його пробивання за рахунок істотного розфокусування кумулятивного струменю.

Дослідження динамічних явищ при поперечному ударі тіла об сталевий канат становлять інтерес також і з огляду істотних труднощів побудови розв'язку задач динаміки ударної взаємодії. Впродовж другої половини 20 та початку 21 століття отримано фундаментальні результати у цій області: розглянуто і побудовано ефективні аналітичні розв'язки задач про удар скінченної маси об безмежну та скінченну пружну нитку при фіксованих та рухомих границях, досліджено явища взаємодії поздовжніх і поперечних хвиль, отримано аналітичні оцінки параметрів ударної взаємодії. У той же час, при наявності істотних нелінійних ефектів, ряд досліджень показують істотні розходження результатів експериментів з результатами розрахунків за відомими аналітичними розв'язками; складність побудови та застосування аналітичних розв'язків істотно



нелінійних задач зумовлює необхідність розробки та застосування числових моделей для дослідження цих динамічних процесів.

Розглядається модельна задача удару деформівного циліндричного тіла скінченних розмірів об сталевий канат захисного екрану (рис. 1).

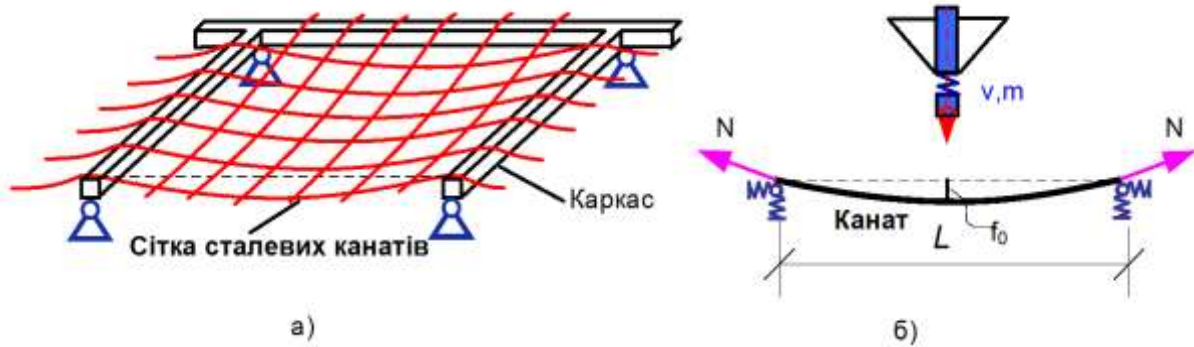


Рисунок 1: а) схема зовнішньої поверхні екрану; б) модельна задача.

Приймається що вектор початкової швидкості циліндричного тіла лежить у площині провисання канату, задається кут нахилу вектора початкової швидкості до горизонталі (кут атаки); у прогоні між опорами каркасу екрану канат має початкове провисання відповідно до величини початкового натягу. Канат описується рівняннями тонкого стержня із врахуванням великих переміщень і кутів повороту, застосовуються відповідні значення редукованих інтегральних жорсткостей перерізу [1] із врахуванням деформацій зсуву, матеріал канату пружно-пластичний із врахуванням швидкості деформацій за законом Джонсона-Кука, параметри якого прийнято згідно [2]. Приймається, що між торцем циліндричного тіла і канатом відбувається односторонній контакт, проковзування канату на опорі відсутнє; каркас сітки моделюється пружними опорами з відповідними жорсткостями.

Задача розв'язується на основі застосування методу скінченних елементів у нелінійній постановці із врахуванням великих переміщень та застосуванням інтегрування системи нелінійних рівнянь руху у часовій області явним методом та додатковими доданками демпфування для стабілізації розв'язку.

На основі розробленої моделі для типових значень маси тіла, його швидкості 50м/с, кута атаки до горизонту від 20° до 70° та при варіативних інших параметрах виконано дослідження основних характеристик процесу ударної взаємодії, хвиль деформацій та зусиль у канаті, зусилля взаємодії з опорами. Виконані обчислення показують наступні напрямки можливих подальших досліджень: вдосконалення моделі і калібрування окремих обчислювальних параметрів; врахування взаємодії канатів у вузлах сітки та із



опорними конструкціями включаючи проковзування канатів на опорах, аналіз впливу параметрів конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Costello G.A. (2012). *Theory of wire rope*. New York: Springer New York.
2. Zhang, R., Li, H., Wang, X., Wu, C., Li, F., & Zhi, X. (2023). Mechanical properties of steel wires of 1670 MPa, 1770 MPa, and 1860 MPa grades under high strain rates and temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 204, May 2023, n.pag.



Сторожук Є.А.¹, Серафимович Р.В.²

¹заст. зав. відділу, д.ф.-м.н., професор, Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка
НАН України, Київ, Україна, stevan@ukr.net

²аспірант, Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, Київ, Україна,
serafymovychr@gmail.com

ПРО МОДЕЛЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ НАВКОЛО КРУГОВИХ ОТВОРІВ У ТРИШАРОВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТАХ РАКЕТ

Анотація. Дано постановку і розроблено методику чисельного розв'язання задач статички для тришарових циліндричних елементів ракетної техніки з круговими отворами. Математичне моделювання напружено-деформованого стану оболонки виконано з використанням точних рівнянь теорії пружності для заповнювача і співвідношень теорії Кірхгофа–Лява для несучих шарів. Поставлену задачу про концентрацію напружень розв'язано методом скінченних елементів.

Ключові слова: тришарова циліндрична оболонка, круговий отвір, концентрація напружень, деформації поперечного зсуву і обтиснення, теорія Кірхгофа–Лява, метод скінченних елементів.

Вступ. Шаруваті пластини та оболонки широко застосовуються в авіа- та суднобудуванні, космічній техніці, цивільному будівництві, радіоелектроніці та інших галузях промисловості. Застосування шаруватих конструкцій дозволяє забезпечити більш високу жорсткість та міцність порівняно з аналогічними одношаровими елементами конструкцій такої ж маси. Для розрахунку шаруватих структур застосовують два підходи [1]: неперервно-структурний і дискретно-структурний. При побудові теорій першого підходу розв'язувальні рівняння отримуються із залученням гіпотез до всього пакету шарів в цілому. Порядок системи рівнянь при цьому не залежить від кількості шарів. В другому підході використовуються теорії, при розробці яких кінематичні гіпотези застосовуються до кожного шару окремо, внаслідок чого порядок розв'язувальної системи залежить від кількості шарів.

Серед шаруватих елементів конструкцій значного поширення набули тришарові циліндричні оболонки. Форму циліндричної оболонки мають: перехідний відсік першого ступеня ракети носія (РН) «Циклон-3»; відсік приладів РН «Зеніт»; корпус хвостового



відсіку вафельного типу; паливний відсік РН «Антарес». За конструктивними та технологічними міркуваннями у вказаних елементах конструкцій ракетної техніки досить часто мають місце отвори і вирізи різної форми.

Матеріал і результати досліджень. Розглянемо циліндричну оболонку, яка складається з трьох шарів зі сталою товщиною $h^{(k)}$ ($k=1,2,3$), ослаблена одним або більшою кількістю кругових отворів і знаходиться під дією поверхневих та крайових сил. Величини для внутрішньої обшивки позначаються індексом (1) зверху, для зовнішньої обшивки – (2), для шару заповнювача – (3). Віднесемо оболонку до криволінійної ортогональної системи координат $Oxuz$, лінії Ox, Oy якої збігаються з лініями головних кривин заповнювача, а лінія Oz напрямлена вздовж зовнішньої нормалі. За поверхню зведення $z=0$ приймемо серединну поверхню заповнювача.

При дослідженні напружено-деформованого стану даного класу оболонок скористаємося дискретно-структурним підходом. Розрахунки будемо виконувати з врахуванням деформацій поперечного зсуву і обтиснення в шарі заповнювача. Вважаємо, що для заповнювача справедливі точні рівняння теорії пружності з лінійною апроксимацією залежності компонентів вектора його переміщень від поперечної координати z [2]. За незалежні змінні приймемо тангенціальні та нормальні переміщення внутрішньої і зовнішньої поверхонь заповнювача $u_1^{(1)}, u_2^{(1)}, u_3^{(1)}, u_1^{(2)}, u_2^{(2)}, u_3^{(2)}$.

Тоді розподіл переміщень заповнювача оболонки за товщиною можна виразити такими співвідношеннями:

$$v_i^{(3)} = u_i^{(3)} + z\psi_i \quad (i=1,2,3), \quad (1)$$

де

$$u_i^{(3)} = (u_i^{(1)} + u_i^{(2)})/2; \quad \psi_i = (u_i^{(2)} - u_i^{(1)})/h^{(3)} \quad (i=1,2,3). \quad (2)$$

Тут $u_i^{(3)}$ ($i=1,2,3$) – переміщення серединної поверхні заповнювача; ψ_1, ψ_2 – кути повороту нормалі до серединної поверхні заповнювача у площинах xz та yz відповідно; ψ_3 – деформація обтиснення заповнювача у поперечному напрямку.

Оскільки товщини обшивок для тришарових конструкцій зазвичай значно менші ніж товщина шару заповнювача, то для обшивок приймаються гіпотези Кірхгофа–Лява.

Розподіл переміщень в обшивках та вирази для кутів повороту їх нормалей мають наступний вигляд:

$$v_1^{(k)} = u_1^{(k)} + [z - (-1)^k c]g_1^{(k)}; \quad v_2^{(k)} = u_2^{(k)} + [z - (-1)^k c]g_2^{(k)}; \quad v_3^{(k)} = u_3^{(k)}; \quad (3)$$



$$g_1^{(k)} = -\frac{\partial u_3^{(k)}}{\partial x}; \quad g_2^{(k)} = \frac{1}{\delta^{(k)}} \left(-\frac{\partial u_3^{(k)}}{\partial y} + \frac{u_2^{(k)}}{R} \right) \quad (k=1,2),$$

де $\delta^{(k)} = 1 + (-1)^k c/R$ ($k=1,2$); $2c = h^{(3)}$; R – радіус серединної поверхні заповнювача.

Використовуючи співвідношення Коші і формули (3), отримаємо вирази для компонентів деформацій обшивок оболонки через незалежні змінні

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^{(k)} &= \frac{\partial u_1^{(k)}}{\partial x}; \quad \varepsilon_2^{(k)} = \frac{1}{\delta^{(k)}} \left(\frac{\partial u_2^{(k)}}{\partial y} + \frac{u_3^{(k)}}{R} \right) \quad (k=1,2); \\ \omega_1^{(k)} &= \frac{\partial u_2^{(k)}}{\partial x}; \quad \omega_2^{(k)} = \frac{1}{\delta^{(k)}} \frac{\partial u_1^{(k)}}{\partial y}; \quad \varepsilon_{12}^{(k)} = \omega_1^{(k)} + \omega_2^{(k)}; \\ \mu_1^{(k)} &= \frac{\partial g_1^{(k)}}{\partial x}; \quad \mu_2^{(k)} = \frac{1}{\delta^{(k)}} \left(\frac{\partial g_2^{(k)}}{\partial y} - \frac{\varepsilon_2^{(k)}}{R} \right); \quad \mu_{12}^{(k)} = \frac{\partial g_2^{(k)}}{\partial x} + \frac{1}{\delta^{(k)}} \left(\frac{\partial g_1^{(k)}}{\partial y} - \frac{\omega_2^{(k)}}{R} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Вважаємо шар заповнювача трансверсально м'яким, тобто при його розрахунках будемо враховувати тільки деформації зсуву і обтиснення в поперечному напрямку

$$\begin{aligned} \varepsilon_{13}^{(3)} &= \frac{\partial u_3^{(3)}}{\partial x} + \psi_1; \quad \varepsilon_{23}^{(3)} = \frac{\partial u_3^{(3)}}{\partial y} - \frac{u_2^{(3)}}{R} + \psi_2; \quad \varepsilon_3^{(3)} = \psi_3; \\ \mu_{13}^{(3)} &= \frac{\partial \psi_3}{\partial x}; \quad \mu_{23}^{(3)} = \frac{\partial \psi_3}{\partial y} - \frac{\varepsilon_{23}^{(3)}}{R}; \quad \mu_3^{(3)} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Фізичні співвідношення запишемо на основі закону Гука для ортотропних матеріалів. Вважаємо, що фізико-механічні параметри оболонки є сталими величинами в межах кожного шару.

Поставлену крайову задачу про концентрацію напружень біля кругових отворів у тришаровій циліндричній оболонці розв'яжемо модифікованим методом скінченних елементів (МСЕ). Запропонований варіант МСЕ має ряд особливостей.

1. Кути повороту нормалей обшивок не визначаються за формулами (3), як це прийнято в класичному МСЕ, а апроксимуються біквдратичними поліномами з виконанням гіпотез Кірхгофа–Лява у вузлах скінченного елемента (СЕ) [3].

2. З метою виключення негативного впливу явищ мембранного і зсувного замикання на збіжність результатів числових розрахунків для компонентів деформацій шарів оболонки застосовується метод подвійної апроксимації [4].

Висновки. Побудований таким чином СЕ тришарової циліндричної оболонки має 40 ступенів свободи, задовольняє умовам неперервності переміщень і кутів повороту



нормалей при переході через сторони СЕ та вільний від явищ мембранного і зсувного замикання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Piskunov, V.G. (2003). An iterative analytical theory in the mechanics of layered composite systems. *Mech. Compos. Mater.*, 39(1), 1–16.
2. Баженов, В.А., Гоцуляк, Е.А., Оглобля, А.И., Динкевич, Ю.Л., & Геращенко, О.В. (1992). *Расчет композитных конструкций с учетом расслоений*. Киев: Будівельник.
3. Areias, P.M.A., Song, J.-H., & Belytschko T. (2005). A finite-strain quadrilateral shell element based on discrete Kirchhoff-Love constraints. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 64, 1166–1206.
4. Bathe, K.-J., Dvorkin, E.N. (1985). A four-node plate bending element based on Mindlin/Reissner plate theory and mixed interpolation. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 21(2), 367–383.



Филь Руслан¹, Мельник Володимир²

¹провідний науковий співробітник, к.ю.н., с.д., Державний науково-дослідний інститут
МВС України, Київ, Україна, e-mail: lkmmkl5555@gmail.com

²провідний науковий співробітник, к.т.н., с.д., Державний науково-дослідний інститут
МВС України, Київ, Україна, e-mail: lkmmkl5555@gmail.com

РОЗРОБЛЕННЯ ВИБУХОЗАХИСНОГО КОНТЕЙНЕРА

Анотація. В результаті роботи розроблено і виготовлено пересувний вибухозахисний контейнер, відповідно до вимог Національної поліції України. Проведено огляд існуючих конструкцій контейнерів. Новизна роботи полягає у створенні вітчизняного зразка пересувного вибухозахисного контейнера. Проведено математичне моделювання (дослідження) нештатної ситуації (детонації) вибухонебезпечних предметів в контейнері. Проведено випробування на полігоні із підривами. Випробування підтвердили відповідність конструкції заявленим характеристикам.

Ключові слова: МВС, ДНДІ, пересувний вибухозахисний контейнер, Національна поліція України, випробування.

З початком широкомасштабної агресії російської федерації проти України на значній частині нашої території зросла кількість вибухонебезпечних предметів (ВНП), які необхідно знешкоджувати. Для знешкодження ВНП можуть використовувати накладний заряд, тобто знешкодження здійснюється шляхом підриву. Не завжди є можливість проводити знешкодження на місці, наприклад в місцях високої щільності населення або поруч/в середині дипломатичних представництв. Тому одним із прийнятних способів вирішення цього питання, є вивіз ВНП в спеціально призначені для цього місця. Також є питання щодо екологічної безпеки. Для вивозу ВНП необхідно створити захисні конструкції, наприклад захисних контейнерів і відповідних причепів до них. Перевезення (транспортування) ВНП до місць їх знешкодження має здійснюватись з дотриманням вимог законодавства, як міжнародного так і України, зокрема Закону України «Про перевезення небезпечних вантажів», Європейської Угоди про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ДОПНВ).

Наразі в Україні і за кордоном є досить обмежена пропозиція щодо пристроїв, які призначені для безпечного транспортування, знешкодження і знищення ВНП. В більшості



випадків це контейнери і вибухові камери, які виготовляються з високоміцної легованої сталі і інших матеріалів, що характеризуються високою міцністю та хорошими показниками в'язкості і призначені для локалізації осколково-фугасної дії продуктів вибуху при можливому спрацьовуванні ВНП певної потужності і маси. Основними недоліками таких контейнерів є складність конструкції і відповідно технологія виготовлення, висока матеріаломісткість і відповідно вага, а також ціна виробу.

До основних представників такого типу захисних пристроїв, розроблених в Україні, відносяться контейнери: ВЗК - 01 «СКАТ» (Державний науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України), «КВЗ - 10» та «СВ - 380» (Державний інженерно-упроваджувальний центр «Спецтехніка» МВС України). Останній встановлено на двовісний причеп ПГМФ 8712 «Омен» і призначений для безпечного транспортування ВНП і вибухових речовин (ВР) потужністю до 1 кг у тротиловому еквіваленті. Серед закордонних виробників можна виділити: контейнер відкритого типу MIESZKO, газонепроникний вибухозахищений контейнер EVA, контейнер AGATA і автомобіль типу IRIS компанії «JAKUSZ» Польща; спеціальний причеп Bomb Containment Trailer System компанії «PKI» Німеччина; спеціалізовані причепа для перевезення ВНП компанії Hurd's Custom Machinery штат Орегон, США. Закупівля іноземних контейнерів і причепів потребує значних коштів, а українські конструкції не мають таких характеристик як іноземні. З метою вирішення проблеми та налагодження виробництва сучасних засобів інженерного оснащення ДНДІ МВС України розробив й налагодив виробництво пересувного вибухозахисного контейнеру. Проведено математичне моделювання (дослідження) нештатної ситуації (детонації) ВНП в контейнері, яке показало що теоретична жорсткість конструкції дослідного зразка забезпечує його цілісність при підриві заряду вибухової речовини: 2 кг у середині по центру дослідного зразка [1-5].

Відповідно вимогам технічного завдання розроблена 3D модель пересувного вибухозахисного контейнера рис. 1.





Рисунок 1 – 3D-модель пересувного вибухозахисного контейнера.

Відповідно до 3D моделі розроблено складальні кресленики, кресленики і специфікації за якими виготовлено пересувний вибухозахисний контейнер, рис. 2.



Рисунок 2 – Пересувний вибухозахисний контейнер.

Виготовлений зразок пересувного вибухозахисного контейнера забезпечує перевезення до місць знищення (утилізації) ВНП та ВР потужністю до 2 кг у тротиловому еквіваленті, що підтверджено проведеними випробуваннями на полігоні із підривами.

Висновки. Результати проведеного математичного моделювання конструкції вибухозахисного контейнеру, щодо стійкості до дії внутрішнього вибухового навантаження підтверджені натурними випробуванням із підривом двокілограмового заряду тротилу із готовими уламками у полігонних умовах.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.

1. Сидоренко Ю. М. Вітчизняні засоби захисту від дії саморобних вибухових пристроїв у місцях великого скупчення людей / Ю. М. Сидоренко, Я. О. Мариненко // Сучасна спеціальна техніка. - 2015. - № 1. - С. 71-77.
2. Спеціалізовані та спеціальні автотранспортні засоби для системи МВС України [Текст] : наук.-практ. посіб. / МВС України, Держ. НДІ ; [упоряд.: М. Г. Вербенський та ін.]. - Київ : ДНДІ МВС України, 2017. - 213 с.
3. Devices for storing and transporting hazardous materials URL: <https://jakusz.com/en/offer/devices-for-storing-and-transporting-hazardous-materials/> (дата звернення 20.01.2025).
4. Bomb Trailer System URL: <https://pki-electronic.com/products/police-customs-and-military-equipment/bomb-trailer-system/> (дата звернення 20.01.2025).
5. Explosive Ordnance Device Trailers URL: <https://www.hurdsinc.com/index.php/explosive-ordnance-device-trailers/> (дата звернення 20.01.2025).



Богдан Дробенко¹, Дмитро Клименко², Володимир Сіренко³, Володимир Харченко⁴

¹пров. н. с., д.ф.-м.н., с.н.с., ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів,
Україна, e-mail: drobenko@ukr.net

²начальник відділу, к.т.н., Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне»
ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: klymenko_dv@hotmail.com

³начальник комплексу, к.т.н., Державне підприємство «Конструкторське бюро
«Південне» ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: v.n.sirenko@i.ua

⁴провідний фахівець, Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне»
ім. М.К. Янгеля», м. Дніпро, Україна, e-mail: volodymyrmx@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ РУЙНІВНИХ ВИПРОБУВАНЬ КОНСТРУКЦІЙ РАКЕТОНОСІВ НА ОСНОВІ УТОЧНЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Анотація. Досліджено механічну поведінку складних структурно-неоднорідних конструкцій ракетної техніки за умов, що відповідають руйнівним випробуванням, в межах геометрично нелінійної пружнопластичності з використанням методу скінченних елементів. Отримані значення руйнівних навантажень та області виникнення максимальних напружень і руйнування у баках паливного відсіку.

Ключові слова: математичне й комп'ютерне моделювання, ракетна техніка, міцність, руйнування.

Вступ. При проектуванні сучасних конструкцій перед нами повстає складний багатоступінчастий процес математичного й комп'ютерного моделювання процесів деформування конструкцій за умов, які моделюють експлуатаційні. У віртуальному просторі практично шукають раціональний проект конструкції, досліджуючи шляхом комп'ютерного моделювання її механічну поведінку за різних геометричних параметрів і матеріалів. За кресленнями раціонального проекту, отриманого на етапі комп'ютерного моделювання, виготовляють фізичний прототип, який піддають всебічним випробуванням. В результаті успішного проходження випробувань переходять до виготовлення серійної продукції. Питома вага засобів математичного й комп'ютерного моделювання в цьому процесі постійно зростає, оскільки експериментальні дослідження механічної поведінки складних конструкцій є доволі обмеженими і надзвичайно коштовними.



Оцінки міцності конструкцій істотно залежать від точності й достовірності даних про їхній напружено-деформований стан за умов експлуатації. Тому актуальним є якнайточніше визначення максимальних напружень в конструкціях на основі високоточних математичних моделей [1].

Засобами математичного і комп'ютерного моделювання отримано експертну оцінку міцності та експлуатаційної надійності ракетних конструкцій складної форми і структури. Досліджено міцність паливних баків за навантаження, що відповідає умовам натурального руйнівного експерименту. За припущення, що переміщення та деформації можуть бути великими, а напруження – істотно перевищувати межу пластичності використовуваних матеріалів, моделювання виконано в межах геометрично нелінійної теорії пружнопластичності із застосуванням методу скінченних елементів [2].

Проаналізовано динаміку зміни найнавантажених місць баків у процесі зростання навантаження, визначено руйнівні навантаження та встановлено характер їхнього руйнування засобами математичного моделювання. Порівняльний аналіз результатів математичного моделювання і відповідних натурних експериментів показав добре узгодження отриманих результатів.

Розроблені засоби математичного й комп'ютерного моделювання дають можливість оптимізувати просторову структуру конструкції за геометричними параметрами. Варіюючи геометричні параметри, зокрема товщини обичайок баків, величини стрингерів, шпангоутів, добираючи відповідні матеріали складових елементів, можна отримувати конструкції з різними запасами міцності.

Висновки. Розроблені засоби математичного й комп'ютерного моделювання надають можливість скоротити кількість натурних експериментів, під час яких конструкцію доводять до руйнування. Після численних обчислювальних експериментів можна виконати натурний експеримент на фізичному прототипі для навантажень, які істотно менші за руйнівні. При виконанні цих експериментів давачі деформацій необхідно ставити в найнапруженіших місцях конструкції, визначених засобами математичного моделювання, після чого порівняти експериментальні значення деформацій в цих місцях з аналогічними значеннями з обчислювального експерименту. У разі збігу результатів для навантажень, менших за руйнівні, відпадає потреба доводити навантаження до руйнівного у фізичному прототипі конструкції. Це дозволить зекономити цінний матеріал і кошти, які йдуть на виготовлення конструкції.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дробенко Б.Д., Будз С.Ф., Асташкін В.І. (2014). Оцінка придатності елементів енергетичного обладнання до експлуатації понад парковий ресурс. *Наука та інновації*, (4), 5 – 17.
2. Bathe, K. (1995). *Finite Element Procedures Analysis*. Englewood Cliffs: *Prentice Hall*.



Микола Хом'як¹¹с.н.с., к. ф.-м. н., ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАНУ, Львів, Україна, e-mail:

khomnick98@gmail.com

РОЗВИТОК МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ АЕРОКОСМІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ УТОЧНЕНИХ ТЕОРІЙ ПЛАСТИН І ОБОЛОНОК

Анотація. Запропоновано нову методику побудови скінченно-елементних моделей з використанням В-сплайнів у межах уточнених теорій пластин та оболонок, що є складниками аерокосмічних конструкцій. Для варіаційної постановки задачі розглянуто теорію мінімального порядку, що враховує деформації трансверсального стиснення та зсуву. Наведено приклади числового розрахунку, проаналізовано розподіл напружень по товщині в пластині з ортотропного композитного матеріалу.

Ключові слова: уточнена теорія пластин і оболонок, метод скінченних елементів, В сплайни.

Вступ. Сучасні композитні матеріали (КМ) та елементи конструкцій з них широко використовуються в передових галузях машинобудування, авіаційної та космічної техніки. Низка переваг, серед яких відносна легкість та міцність конструкцій з КМ, проблемноорієнтоване проєктування під умови експлуатації, зумовлює потребу розвинених методів розрахунку і комп'ютерного моделювання для різних етапів проєктування, міцнісних та верифікаційних задач, у комплексі з експериментальними дослідженнями. Конструкціям спеціального призначення притаманні свої особливості, зокрема, часто вони є пластинами та оболонками складної геометрії, мають анізотропію властивостей або шарувату структуру. Протягом десятиліть розвинуто багато уточнених теорій пластин і оболонок, найперше, в межах пружного деформування, з урахуванням зсувних деформацій, а також повного просторового напруженого стану. Спрощення, які передбачають ці теорії порівняно з теорією пружності дають змогу практично отримати числові результати щодо деформацій, оцінити критерії міцності, вибрати раціональні параметри конструкції.

Стрімкий прогрес комп'ютерних технологій і обчислювальних ресурсів, наявність комерційного програмного забезпечення на основі методу скінченних елементів (МСЕ) може породити ілюзію про утилітарний підхід до практики інженерних розрахунків як ввід даних, побудови густих тривимірних сіток, компонування графічно



оформлених числових результатів у звіти. Разом з тим, актуальною проблемою є валідація та верифікація моделей щодо конкретних об'єктів дослідження, точність та збіжність математичних методів, "прозорість" та можливість адаптації програмних модулів. Розвиток нових методів, очевидно, не має сприйматися як заперечення вже апробованих підходів чи як чисто теоретичний інтерес, але як інструментарій, що доповнює можливості моделювання, порівняння результатів щодо точності та ефективності, перевірки гіпотез про важливі параметри моделі тощо. Накопичення таких знань сприяє також високому рівню інженерної освіти.

Метою даної доповіді є ознайомлення з наявними напрацюваннями щодо розвитку МСЕ в межах уточнених теорій пластин і оболонок з використанням розкладів характеристик напружено-деформованого стану в ряди по поліномах Лежандра від координати, зв'язаної з товщиною. Теоретично це дає змогу понизити розмірність задачі, забезпечуючи заданий порядок точності для компонент нормальних та зсувних напружень у трансверсальному напрямі до серединної поверхні. Розглядаючи шаруватий композит як дискретну структуру за умови виконання кінематичних і силових умов на інтерфейсних поверхнях шарів, запропоновано узагальнені моделі та змішану схему методу скінченних елементів, що має змогу моделювати неідеальний механічний контакт [1]. Результати досліджень. Для підвищення точності обчислення напружень в класичних схемах МСЕ через похідні функцій переміщення запропоновано використовувати Всплайни в ролі базисних функцій МСЕ. Ізогеометричні апроксимації (форми-геометрії та шуканих невідомих) дають змогу використати CAD-документацію (де раціональні і Всплайни є стандартом для опису об'єктів) та поєднати з уточненими СЕ-моделями.

Застосування поліномів Лежандра передбачає розвинення усіх компонентів напружено-деформованого стану в ряди, в яких утримуємо певну кількість членів виду $\sigma_{ij} = \sum \sigma_{ij}^k(x, y) P_k(z/h)$, а також задовольняємо задані умови навантаження в напруженнях на лицьових поверхнях, $\sigma_{i3}(\pm h) = \sigma_{i3}^\pm$. Це дає змогу редукувати систему рівнянь просторової теорії пружності до двовимірного випадку. Еквівалентна варіаційна постановка задачі в межах теорії типу С.П. Тимошенка або теорії мінімального порядку [3]

$$\delta \int_{-l}^l \{ [A]_B \tilde{u}_B + ([V]_B^+ - [F]_B^+) \sigma_+ + ([V]_B^- - [F]_B^-) \sigma_- \}^T \delta \tilde{u}_B dx + \\ + \int_{-l}^l \{ [A]_M \tilde{u}_M + ([V]_M^+ - [F]_M^+) \sigma_+ + ([V]_M^- - [F]_M^-) \sigma_- \}^T \delta \tilde{u}_M dx = 0$$



є основою побудови схем МСЕ в узагальнених переміщеннях.. Використовуючи В-сплайни як базисні функції $u_i(x, y) = \sum c_{kl} B_k(x) B_l(y)$, $B_k(x), B_l(y) \in H_0^1$ (Рис. 1 а), отримаємо систему рівнянь для визначення невідомих коефіцієнтів c_{kl} . Зауважимо, що вибір апроксимацій на границі вимагає деяких модифікацій згідно з відомими підходами (Рис. 1 б).

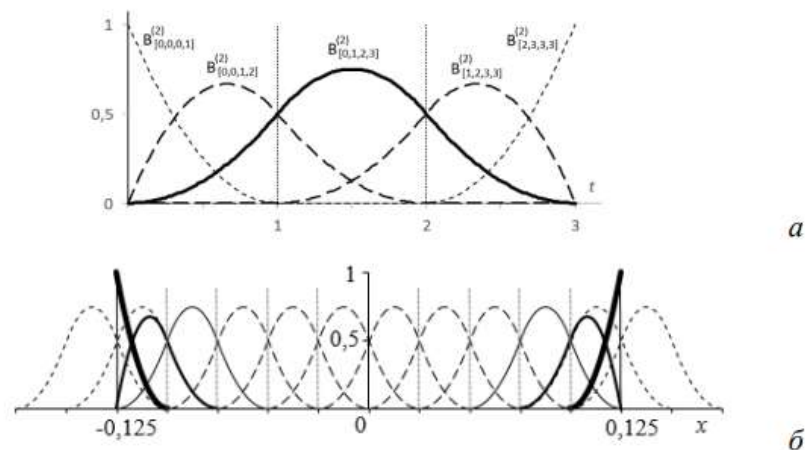


Рисунок 1 – Стандартні квадратичні В-сплайни (а) та система лінійно-незалежних функцій (б) для заданого розбиття $x \in [-0,125; 0,125]$ з кроком $d = 0,025$

Розглянуто, зокрема, тестову задачу згину шарнірно опертою видовженої смуги поперечним навантаженням. Реставрація розподілу напружень по товщині після отримання чисельних результатів (вузлових невідомих чи ступенів вільності для переміщень і напружень) виконується аналітично, на відміну від усталених методів аналізу інтегральних по товщині характеристик (зусиль-моментів у припущенні лінійного розподілу по товщині). Це може бути використано і важливо для прогнозування міцності та руйнівних процесів (розрив армувальних волокон у шаруватих КМ, розшарування тощо).

Висновки. Розроблено, досліджено особливості та апробовано нові схеми МСЕ з використанням В-сплайнів для розрахунків на міцність композитних ортотропних пластин і оболонок, що використовують уточнені теорії з урахуванням трансверсальних зсувів та стиснення.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Марчук, М.В., & Хом'як, М.М. (2003) Змішана схема методу скінченних елементів для розрахунку шаруватих композитних оболонок і пластин. – Львів: ІППММ НАН України.
2. Харченко, В.М., & Марчук, М.В., & Пакош, В.С. (2016) Варіант уточненої теорії мінімального порядку податливих до зсуву та стиснення пластин. Прикл. проблеми мех. і мат. (14), 107–112.
3. Хом'як, М.М. (2022) Тестування схем методу скінченних елементів з використанням В-сплайнів для пластини-смуги в межах гіпотез Кірхгофа–Лява та С.П. Тимошенка. Прикл. проблеми мех. і мат. (20), 61-76.



Назарій Лопух¹, Микола Хом'як²

¹с.н.с., к.т.н., ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАНУ, Львів, Україна,

e-mail: lopuh.nazar@gmail.com

²с.н.с., к.ф.-м.н., ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАНУ, Львів, Україна,

e-mail: khomnick98@gmail.com

Розробка програмного забезпечення для Інтеграції числового моделювання корпусів окислювальних баків з інтерфейсом користувача

Анотація. Робота присвячена розробці інтерфейсу користувача в Delphi для автоматизації процесу моделювання та аналізу міцності окислювальних баків ракети. Інтерфейс забезпечує зручний ввід параметрів, автоматичну генерацію вхідних даних для ANSYS, запуск симуляцій та візуалізацію результатів у вигляді графіків і кольорових карт напружень. Реалізовано зв'язок із ANSYS через APDL та COM-об'єкти, що дозволяє зменшити час підготовки розрахунків і мінімізувати ризики помилок. Запропоноване рішення значно спрощує проведення розрахунків, підвищує ефективність аналізу та може бути використане для подальшої оптимізації конструкцій.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, метод скінченних елементів.

Вступ. Окислювальні баки є невід'ємною складовою ракетних паливних систем, забезпечуючи зберігання та подачу рідкого окислювача під тиском. Їхні конструкції піддаються складним експлуатаційним умовам, включаючи кріогенні температури, високі динамічні навантаження та гідродинамічні ефекти, пов'язані з рухом рідини. У зв'язку з цим, точне числове моделювання напружено-деформованого стану (НДС), термомеханічної поведінки та динамічної взаємодії пального з оболонкою є критично важливим для забезпечення надійності таких систем.

Моделювання корпусів окислювальних баків ракет є складним інженерним завданням, що потребує точного врахування механічних, теплових та гідродинамічних впливів. У рамках цієї роботи було реалізовано інтеграцію середовища числового аналізу ANSYS з користувацьким інтерфейсом, створеним зовнішнім програмним забезпеченням [1, 2], що спрощує процес введення параметрів, запуску розрахунків та візуалізації результатів.

Інтеграція між CAD/CAE системами, як от ANSYS, із графічним інтерфейсом введення/виведення проблемно-орієнтованого програмного забезпечення (ПЗ) має



вирішальне значення для покращення робочих процесів проектування, зменшення кількості помилок і підвищення загальної ефективності. Графічні інтерфейси користувача дозволяють інженерам попередньо обробляти й уточнювати дані перед тим, як надсилати їх до ANSYS для моделювання. Багато ПЗ сторонніх виробників надають можливості створення сценаріїв та макросів для автоматизації введення/виведення даних, зменшуючи людські помилки та підвищуючи ефективність [3, 4].

API користувача та APDL дають змогу ANSYS взаємодіяти із зовнішнім ПЗ, забезпечуючи автоматизоване моделювання та дослідження параметрів, а тому інженери можуть проводити багатопараметричне моделювання більш ефективно. Також це є інструментом попередньої або постобробки, щоб допомогти інженерам візуалізувати та маніпулювати даними до та після моделювання.

Для спрощення процесу підготовки розрахунків та аналізу результатів було створено графічний інтерфейс користувача (GUI) у Delphi, який:

- Автоматизує введення параметрів (матеріал, товщина стінок, температура, тиск тощо).
- Генерує вхідні файли для ANSYS на основі введених параметрів.
- Запускає розрахунки ANSYS через API та відстежує їх виконання.
- Візуалізує результати у вигляді графіків та кольорових карт напружень, температурних полів, потоків рідини.



Рис. Інтерфейс програмного продукту TANK 1.0

В головному меню програми закладений доступ до всіх інструментів управління програмою. У головному меню програми є можливості відкриття та збереження даних у відповідні двійкові, або текстові файли; збереження даних у спеціальному форматі *.mas файлів. Розроблені інструменти для налаштування авто шляхів до потрібних файлів.



Для зв'язку з ANSYS було використано скриптовий інтерфейс APDL (ANSYS Parametric Design Language) та комунікацію через COM-об'єкти.

Технологічні аспекти інтеграції

- Формування командних файлів для ANSYS безпосередньо з Delphi.
- Запуск розрахунків у фоновому режимі та отримання статусу виконання.
- Обробка вихідних даних та перетворення їх у візуально зрозумілі графічні результати.
- Підтримка експорту даних у формати, сумісні з іншими CAD/CAE-системами.

Висновки та перспективи. Запропонований підхід дозволяє значно підвищити ефективність інженерного аналізу корпусів баків, мінімізуючи ризики помилок при підготовці розрахунків. Подальші роботи будуть зосереджені на: оптимізації продуктивності взаємодії Delphi ↔ ANSYS, додаванні підтримки додаткових режимів аналізу (наприклад, моделювання руйнування та адаптивної оптимізації матеріалів) а також інтеграції штучного інтелекту для прогнозування критичних навантажень на основі машинного навчання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Марчук Михайло, Дробенко Богдан, Лопух Назарій, Клименко Дмитро, Пакош Віра, Сіренко Володимир, Харченко Володимир, Хом'як Микола: Математичне й комп'ютерне моделювання стосовно проблеми конструкційної міцності корпусів двигунів ракетної та ракетно-космічної техніки // наукова конференція “математичні проблеми механіки неоднорідних структур” – Львів, 2024.

2. Михайло Марчук, Назарій Лопух, Микола Хом'як Комп'ютерне моделювання композитних оболонкових елементів ракетно-космічної техніки // Наукова конференція «сучасні розрахунково-експериментальні методи визначення характеристик ракетно-космічної техніки» – Дніпро, 2019.

3. Madenci, E., & Guven, I. (2015). The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®. Second Ed. Springer, 2015

4. Thompson M. K., Thompson J. M. ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis (2017). – Elsevier. – 448 p



О.М.Шикула¹, Н.Б.Жукова²

¹ *провідний науковий співробітник, доктор фіз.-мат. наук, професор, Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ; професор, Державний університет інформаційно-телекомунікаційних технологій; Київ, Україна, e-mail: ensh@ukr.net*

² *старший науковий співробітник, кандидат фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник, Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ, Київ, Україна, e-mail: zhukova_n@ukr.net*

ПРОГНОЗУВАННЯ ДЕФОРМАТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ІЗОТРОПНИХ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ З РОЗОРІЄНТОВАНИМИ ВОЛОКНАМИ ТА НЕЛІНІЙНОЮ МАТРИЦЕЮ

Анотація. Побудовано модель нелінійного деформування волокнистих матеріалів з волокнами, дезорієнтованими в площині, та фізично нелінійною матрицею. За допомогою методу умовних моментів Л.П.Хорошуна та схеми Фойгта визначено ефективні деформативні властивості та напружено-деформований стан матеріалу. Для розв'язання нелінійних рівнянь використовується ітераційний метод. Побудовано зв'язок між макронапруженнями та макродеформаціями, а також криві деформування матеріалу.

Ключові слова: трансверсально-ізотропний волокнистий матеріал, розорієнтовані волокна, нелінійна матриця, ефективні деформативні властивості, напружено-деформований стан, вплив нелінійності

Вступ. В умовах високих навантажень у багатьох однорідних і композитних матеріалів залежності між макронапруженнями та макродеформаціями є нелінійним. Це може бути наслідком фізично нелінійного деформування компонентів [2]. Матеріали з розорієнтованими волокнами застосовуються в конструкціях, які використовуються в умовах високих силових та температурних навантажень. Тому прогнозування їх нелінійних властивостей є актуальним. Метою даної роботи є побудова моделі та дослідження нелінійного деформування трансверсально-ізотропних волокнистих матеріалів з розорієнтованими волокнами та фізично нелінійною матрицею.

Волокнистий матеріал стохастичної структури з просторово розорієнтованими волокнами будемо розглядати як сукупність підсистем, кожна з яких є односпрямованим волокнистим матеріалом з волокнами, орієнтованими під певним кутом відносно загальної системи координат. Беремо трансверсально-ізотропний матеріал волокон з віссю симетрії уздовж волокон та ізотропний фізично нелінійний матеріал матриці.



Об'ємні вмісти волокон і матриці позначимо відповідно c_1 і c_2 , при цьому $c_1 + c_2 = 1$.

Ефективні деформативні характеристики матеріалу будемо визначати в два етапи. На першому етапі на основі моделі односпрямованого волокнистого матеріалу стохастичної структури [1, 3, 4] методом умовних моментів [1, 3, 4] визначимо ефективні властивості підсистеми, що є односпрямованим волокнистим матеріалом. На другому етапі на основі схеми Фойхта за обчисленими властивостями підсистем визначимо ефективні властивості матеріалу з просторово розорієнтованими волокнами.

Матеріал і результати досліджень. На першому етапі визначимо ефективні деформативні властивості односпрямованого волокнистого матеріалу. Нехай λ_{ij}^1 – пружні сталі волокон, а $\lambda_2 = \lambda_2(\varepsilon)$, $\mu_2 = \mu_2(\varepsilon)$ – деформативні характеристики матриці, які залежать від деформації. Тоді вирази для ефективних характеристик підсистеми мають вигляд [1, 3, 4]

$$\begin{aligned}\lambda_{11}^{*(k)} + \lambda_{12}^{*(k)} &= c_1^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^{(k)}(\lambda_2 + \mu_2) - \frac{c_1^{(k)}c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)} - 2\lambda_2 - 2\mu_2)^2}{2c_1^{(k)}(\lambda_2 + \mu_2) + c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\ \lambda_{11}^{*(k)} - \lambda_{12}^{*(k)} &= c_1^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^{(k)}\mu_2 - \frac{c_1^{(k)}c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)} - 2\mu_2)^2}{2c_1^{(k)}\mu_2 + c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) + \frac{2m^{(k)}n^{(k)}}{n^{(k)} + 2m^{(k)}}}; \\ \lambda_{13}^{*(k)} &= c_1^{(k)}\lambda_{13}^{(k)} + c_2^{(k)}\lambda_2 - \frac{c_1^{(k)}c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)} - 2\lambda_2 - 2\mu_2)(\lambda_{13}^{(k)} - \lambda_2)}{2c_1^{(k)}(\lambda_2 + \mu_2) + c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\ \lambda_{33}^{*(k)} &= c_1^{(k)}\lambda_{33}^{(k)} + c_2^{(k)}(\lambda_2 + 2\mu_2) - \frac{2c_1^{(k)}c_2^{(k)}(\lambda_{13}^{(k)} - \lambda_2)^2}{2c_1^{(k)}(\lambda_2 + \mu_2) + c_2^{(k)}(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\ \lambda_{44}^{*(k)} &= c_1^{(k)}\lambda_{44}^{(k)} + c_2^{(k)}\mu_2 - \frac{c_1^{(k)}c_2^{(k)}(\lambda_{44}^{(k)} - \mu_2)^2}{c_1^{(k)}\mu_2 + c_2^{(k)}\lambda_{44}^{(k)} + s^{(k)}};\end{aligned}\quad (1)$$

Ефективні характеристики (1) – компоненти тензорів ефективних пружних характеристик в локальній системі координат x'_i , де вісь x'_3 паралельна волокнам підсистеми. В загальній системі координат згідно перетворенню

$$\begin{aligned}x_i &= \alpha_{ij}x'_j; \quad x'_i = \alpha_{ji}x_j; \quad \alpha_{11} = \cos\theta\cos\varphi; \quad \alpha_{12} = -\sin\varphi; \quad \alpha_{13} = \sin\theta\cos\varphi; \\ \alpha_{21} &= \cos\theta\sin\varphi; \quad \alpha_{22} = \cos\varphi; \quad \alpha_{23} = \sin\theta\sin\varphi; \quad \alpha_{31} = -\sin\theta; \quad \alpha_{32} = 0; \quad \alpha_{33} = \cos\theta.\end{aligned}\quad (2)$$

Тензори ефективних деформативних характеристик $\lambda_{ijlm}^{*(k)}$ в загальній системі координат виражаються через відповідні тензори $\lambda_{ijlm}^{*(k)}$ в локальній системі координат співвідношеннями



$$\lambda'_{ijlm} = \alpha_{ip} \alpha_{jq} \alpha_{lr} \alpha_{ms} \lambda^*_{pqrs}. \quad (3)$$

Ефективні характеристики всієї системи, що є волокнистим матеріалом з просторово розорієнтованими волокнами, відповідно до схеми Фойхта на другому етапі визначаються через усереднення визначених на першому етапі ефективних характеристик підсистем, що є односпрямованими волокнистими матеріалами, по деякій

щільності розподілу

$$f(\theta, \varphi) \lambda^{**}_{ijlm} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \lambda'_{ijlm} f(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{ip} \alpha_{jq} \alpha_{lr} \alpha_{ms} \lambda^*_{pqrs} f(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (4)$$

У випадку фізичної нелінійності матриці, оскільки $\lambda_2(<\varepsilon_{ij}^2>)$, $\mu_2(<\varepsilon_{ij}^2>)$, ефективні деформативні характеристики (4) також є функціями середніх в матриці деформацій $<\varepsilon_{ij}^2>$. Тому для визначення ефективних деформативних властивостей матеріалу потрібно встановити зв'язок між середніми деформаціями в матриці $<\varepsilon_{ij}^2>$ та макродеформаціями $<<\varepsilon_{ij}>>$

$$c_2 <\varepsilon_{ij}^2> = -[\lambda_{ijpq}^{1*} - \lambda_{ijpq}^2]^{-1} [\lambda_{pqlm}^{**} - \lambda_{pqlm}^{1*}] <<\varepsilon_{lm}>>. \quad (5)$$

На основі співвідношень (1), (4), (5) можна написати ітераційний алгоритм визначення ефективних деформативних характеристик матеріалу та його напружено-деформованого стану.

На рис.1 – 4 наведено графіки залежностей осьових та зсувних макронапружень від макродеформацій при різних об'ємних концентраціях волокон та частці волокон в напрямку x_3 у випадку волокон, розорієнтованих в площині x_1x_2 та розташованих по нормалі до неї. Нелінійність матриці суттєво впливає на ефективні деформативні властивості та напружено-деформований стан матеріалу при всіх значеннях об'ємного вмісту волокон $c_1 < 1$.

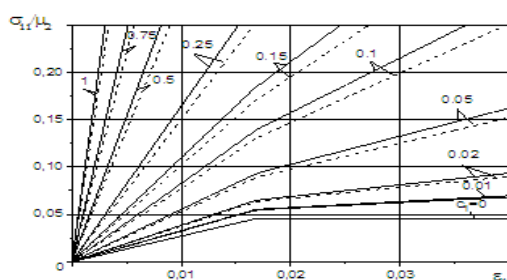


Рисунок 1 – Графіки залежностей

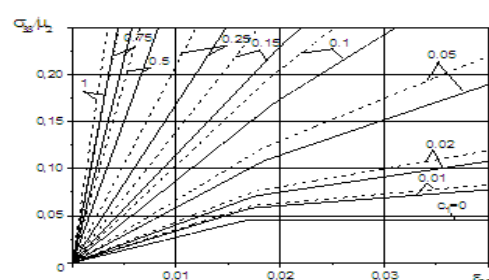


Рисунок 2 – Графіки залежностей



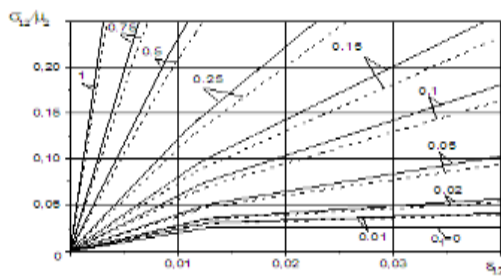
макронапруження $\langle\langle \sigma_{11} \rangle\rangle / \mu_2$ від макродеформації $\langle\langle \varepsilon_{11} \rangle\rangle$ 

Рисунок 3 – Графіки залежностей

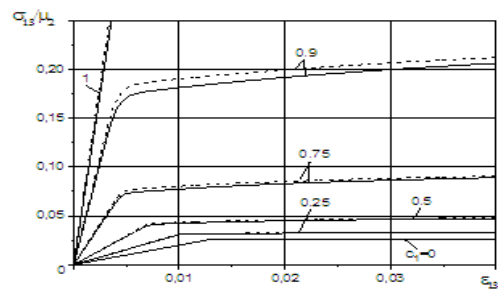
макронапруження $\langle\langle \sigma_{12} \rangle\rangle / \mu_2$ від макродеформації $\langle\langle \varepsilon_{12} \rangle\rangle$ макронапруження $\langle\langle \sigma_{33} \rangle\rangle / \mu_2$ від макродеформації $\langle\langle \varepsilon_{33} \rangle\rangle$ 

Рисунок 4 – Графіки залежностей

макронапруження $\langle\langle \sigma_{13} \rangle\rangle / \mu_2$ від макродеформації $\langle\langle \varepsilon_{13} \rangle\rangle$

Висновки. Як бачимо, матеріал добре витримує всі осьові навантаження, нелінійно деформується тільки при невеликому об'ємному вмісті волокон, а при зсувних навантаженнях в деяких напрямках нелінійність матриці дуже суттєво впливає на деформування композиту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гузь, А., & Хорошун, Л., & Михайлова, М., & Бабич, Д., & Шикула, Е. (2003). *Механика композитов: В 12 т. Т. 12: Прикладные исследования*. А.С.К.
2. Каудерер, Г. (1961). *Нелинейная механика*. Иностранная литература.
3. Хорошун, Л., & Шикула, Е. (2015). Деформирование физически нелинейных стохастических композитных материалов. Деформирование и кратковременная повреждаемость физически нелинейных стохастических композитных материалов. *Успехи механики: В 6-ти томах. Том 6 (книга 2)*. Литера ЛТД.
4. Шикула, О., & Жукова, Н. (2024). Модель деформування просторово-армованих волокнистих матеріалів з фізично нелінійною матрицею. *Прикладна механіка*, (6), 77-100.



Dmytro Kolosov¹, Serhii Onyshchenko², Olena Bilous³, Hanna Tantsura⁴

¹Head of the Department of Mechanical and Biomedical Engineering,
Dr. Sci. (Engin.), Prof., Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail:

kolosov.d.l@nmu.one

²Associate Professor of the Department of Mechanical and Biomedical Engineering,
Cand. Sci. (Engin.), Ass. Prof., Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail:

onyshchenko.s.v@nmu.one

³Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering,
Cand. Sci. (Engin.), Ass. Prof., Dniprovsk State Technical University, Dnipro, Ukraine, e-

mail: bilouselena66@gmail.com

⁴Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering,
Cand. Sci. (Engin.), Ass. Prof., Dniprovsk State Technical University, Dnipro, Ukraine, e-

mail: hannaivan71@gmail.com

MATHEMATICAL MODELLING OF STRESS-STRAIN STATE IN COMPOSITE STAY ROPE WITH LOCAL FIBER BREAKAGE

Abstract. The calculation method of a stress-strain state of a stay rope of composite fiber structure considering the breakage of one of its fibers is established. The scientific novelty of research is in determining that the length of manifestation of a local disturbance of a stress-strain state of composite stay rope is proportional to a square root of a ratio of tensile modulus of a reinforcing element material and shear modulus of an elastic material that connects them.

Keywords: Stay Rope, Cable-Stayed Structure, Orthotropic Composite, Reinforcing Element, Breakage, Stress-Strain State, Local Disturbance, Fiber Displacement, Internal Loading Forces.

Introduction. Steel-reinforced concrete cable-stayed structures, including cable-stayed bridges, are less material-intensive, more technological in manufacturing and construction. A method for calculating an stress-strain state (SSS) of a multilayer fiber orthotropic composite with breakage in continuity of individual discrete reinforcing fibers, taking into account the multilayer structure, is not yet developed.

Research material and results. We accept the rope length equal to L . We direct x -axis along the rope. Align the beginning of x -axis with one of the stay rope ends. We assign numbers i to reinforcing fibers in layers. Assign numbers j to layers. The total amount of fibers in layers of



this composite and the amount of layers in it is equal to each other and are denoted M and N respectively. There is a breakage in continuity of the fiber numbered I in the layer numbered J in cross-section $x = l$ of a stay rope. We denote fiber displacement along the rope as u . The internal loading force of a fiber is p . The notation of displacements and forces are supplemented with indices i, j .

Boundary conditions of interaction of the ends of a stay rope of length L with the structure and the conditions created by the breakage of continuity of a fiber are

$$\text{when } x = 0, u_{i,j} = 0, \quad (1)$$

$$\text{when } x = L, u_{i,j} = u_{i\pm 1, j\pm 1}, \quad (2)$$

$$\text{when } x = l, p_{i,j}(x = l + \varepsilon) - p_{i,j}(x = l) \rightarrow 0, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{when } x = l, u_{i,j}(x = l + \varepsilon) - u_{i,j}(x = l) = \\ = U_0 \begin{cases} 0, & i \neq I \vee j \neq J \\ 1, & i = I \wedge j = J \end{cases} \wedge p_{I,J}(x = l + \varepsilon) = p_{I,J}(x = l) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

where U_0 is the gap between the fiber ends formed by a breakage in continuity.

We conditionally cut out a part of prismatic shape from an arbitrary i, j^{th} fiber of the composite together with a matrix of small length dx . Prism base is a square with a side equal to the fiber placement spacing a (Fig. 1).

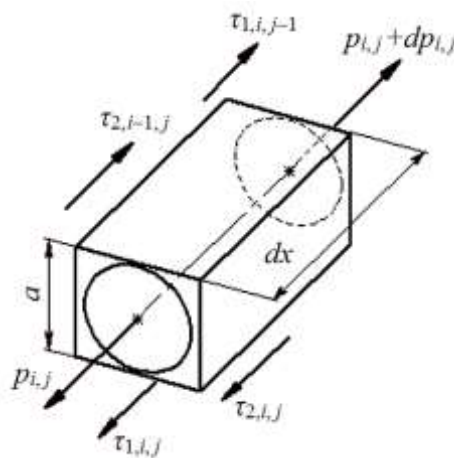


Figure 1 – Part of a matrix of small length of the composite with fibers placed with a spacing a

Let's formulate the equilibrium condition of an elastic matrix part together with a fiber (see Fig. 1)

$$dp_{i,j} + (\tau_{1,i,j-1} - \tau_{1,i,j} + \tau_{2,i-1,j} - \tau_{2,i,j})a \cdot dx = 0, \quad (5)$$



where $\tau_{1,i,j} = \frac{G k_G}{a-d}(u_{i,j} - u_{i,j-1})$; $\tau_{2,i,j} = \frac{G k_G}{a-d}(u_{i,j} - u_{i-1,j})$; G , k_G are, respectively, shear modulus and shape influence coefficient on rigidity of an elastic matrix material; d is diameter of fibers in the composite.

Using Hooke's law, after a series of transformations, we obtained solutions to equilibrium Eq. 5 in displacements and loading forces on fibers

$$p_{i,j} = \frac{1}{E F} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \left(A_{m,n} e^{\beta_{m,n} x} - B_{m,n} e^{-\beta_{m,n} x} \right) \beta_{m,n} c(\mu_m, i) c(\chi_n, j) + \sum_{m=1}^M \left(A_{m,m} e^{\beta_{m,m} x} - B_{m,m} e^{-\beta_{m,m} x} \right) \beta_{m,m} c(\mu_m, i) + \sum_{n=1}^N \left(A_{n,n} e^{\beta_{n,n} x} - B_{n,n} e^{-\beta_{n,n} x} \right) \beta_{n,n} c(\chi_n, j) \right) + P, \quad (6)$$

where $A_{m,n}$, $B_{m,n}$, $A_{m,m}$, $B_{m,m}$, $A_{n,n}$, $B_{n,n}$ are arrays of coefficients; $\mu_m = \frac{\pi m}{M}$,

$\chi_n = \frac{\pi n}{N}$; $c(\mu_m, i) = \cos(\mu_m(i-0.5))$; $c(\chi_n, j) = \cos(\chi_n(j-0.5))$; P is average loading

force on one fiber; δ is displacement of the composite structure as a rigid body; $\beta_{m,n}$, $\beta_{m,m}$, $\beta_{n,n}$ are characteristic indicators selected from the condition of solving homogeneous systems

of fiber equilibrium Eq. 5, $\beta_{m,n} = \pm \sqrt{\frac{2 G a}{E F (a-d)} (2 - \cos(\chi_n) - \cos(\mu_m))}$,

$$\beta_{m,m} = \pm \sqrt{\frac{2 G a}{E F (a-d)} (1 - \cos(\mu_m))}, \quad \beta_{n,n} = \pm \sqrt{\frac{2 G a}{E F (a-d)} (1 - \cos(\chi_n))}.$$

Dependencies in Eq. 6 are constructed for unbroken fibers. They cannot be used under conditions in Eq. 3 and 4. We conditionally divide the stay rope into two separate parts using the plane that coincides with a cross-section of fiber breakage. We assign these parts the numbers 1 and 2. We add the numbers 1 and 2 to the indices of quantities that relate only to the formed parts 1 and 2. Taking into account the above, the boundary conditions in Eq. 1 and 2 allow determining some arrays of constant coefficients through others.

As an example, a stay rope made of five layers with five fibers in each layer is considered. Their tensile modulus $E = 10^5$ MPa. Shear modulus of elastic material $G = 1$ MPa. Fiber diameter $d = 8.25$ mm. The placement spacing of fibers and layers in the composite $a = 1.2d$.

In a cross-section at a distance l from the fixed end, one fiber is considered to have a gap. For this case, maximum values of loading coefficients on reinforcing fibers and sizes of gaps between the ends of the fiber in a breakage cross-section for different values of stay rope length



and a distance from one end of the fixing to the cross-section of fiber breakage are determined. In practice, any fiber can be damaged. At the same time, it is possible to single out two fibers, for which the conditions of interaction with other fibers are the most different. These are the corner and the central fibers. The corner fiber interacts with the minimum number of fibers - two. The central fiber interacts with four symmetrically located and symmetrically loaded fibers. These cases can be considered extreme. Let's consider them. Figs. 2 and 3 show the distributions of internal forces and displacements of fibers placed according to the 5×5 scheme in a composite sample five meters long, with a fiber broken in a cross-section of sample symmetry.

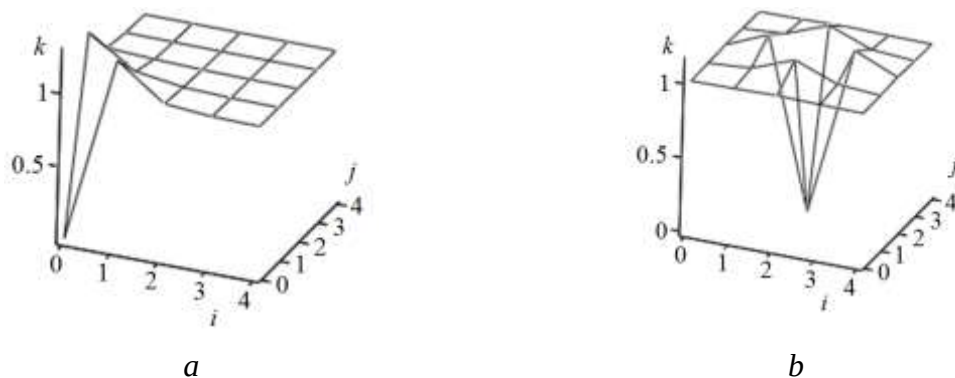


Figure 2 – Coefficients of loading distribution k in a composite five meters long, structured according to 5×5 scheme, with a fiber broken in a cross-section of symmetry: a – corner fiber broken; b – central fiber broken

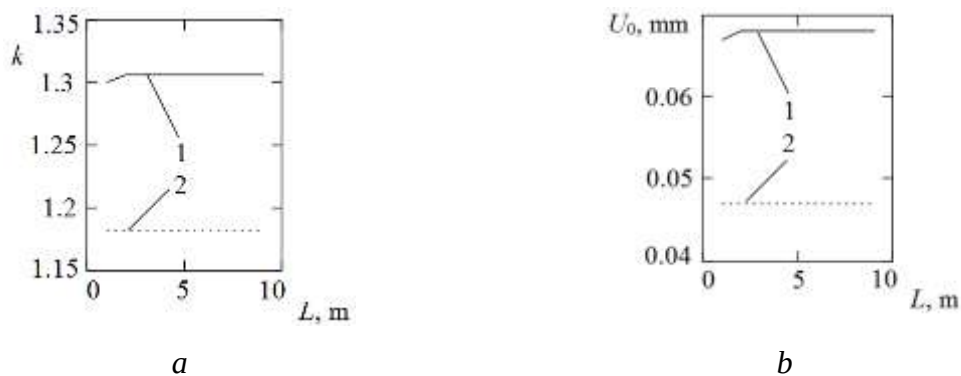


Figure 3 – Maximum values of coefficients of loading distribution k (a) and gaps U_0 (b) for different lengths L of a sample structured according to 3×3 scheme with a broken fiber: 1 – corner fiber broken; 2 – central fiber broken

Conclusion

A model of interaction for fibers in an orthotropic fiber composite considering a breakage in continuity of one of its fibers is constructed. Gap size between the ends of a broken fiber from loading a stay rope within the boundaries of linear deformation, is proportional to the load, also depends on the minimum distance between the cross-section of breakage and the connected end



of the stay rope. Fiber breakage locally disturbs an SSS of a stay rope. In the considered case, the zone of disturbance does not exceed 3 to 4 m. The length of manifestation of local SSS disturbance of a stay rope is proportional to the square root of the ratio of tensile modulus of fiber material and shear modulus of a material connecting the fibers into a rope. It also depends on a reinforcing element diameter. A diameter decrease is accompanied by a decrease in an SSS disturbance zone. When the amount of layers is different from the amount of fibers in a rope layer, this leads to practically a double increase in tangential stresses in elastic material of a stay rope with a broken fiber.



Вороновський Дмитро ^{1,2}, Кулагін Сергій ¹, Юрков Богдан ^{1,2}, Асмоловський Сергій ^{2,3}

¹науковий співробітник, доктор філософії, вчене звання, інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ, Дніпро, Україна, e-mail: voronovskiydk@gmail.com

²інженер-конструктор, SETS (Space Electric Thruster Systems), Дніпро, Україна, e-mail: dmitriy.voronovskiy@sets.space

³аспірант, ДНУ ім.О. Гончара, Дніпро, Україна, e-mail: asmolovskiy.sergey@gmail.com

ПОРІВНЯННЯ ХАРАКТЕРИСТИК «КЛАСИЧНОГО» ХОЛЛОВСЬКОГО ДВИГУНА І МАГНІТНО-ЕКРАНОВАНОГО

Анотація. Ця робота порівнює характеристики класичного Холловського двигуна ST-100 та магнітно-екранованого ST-100M, розробленого для зменшення ерозії. Виявлено, що ST-100M має переваги у довговічності для довготривалих місій, тоді як ST-100 залишається оптимальним для короткострокових місій завдяки простоті та економічності.

Ключові слова: Холловський двигун (ХД), магнітне екранування, ерозія, плазма, вакуум, космос.

Вступ. Холловські двигуни (ХД) є ключовою технологією в сучасній космічній техніці, широко використовуваною для корекції орбіти та міжпланетних польотів. Їх привабливість пояснюється високою ефективністю використання палива та надійністю роботи. Проте одним із основних викликів у використанні класичних ХД є ерозія стінок каналу через взаємодію з плазмою, що обмежує термін їх служби. Двигун ST-100, розроблений компанією SETS (Space Electric Thruster Systems), є прикладом такого класичного ХД. Магнітно-екранований двигун ST-100M був створений як модернізована версія ST-100 для вирішення проблеми ерозії. Ця робота зосереджена на порівнянні тяговоенергетичних характеристик цих двигунів для оцінки їх придатності в різних типах космічних місій.

Обговорення. Класичний ХД ST-100 працює на принципі іонізації газу (зазвичай ксенону) та прискорення іонів за допомогою електромагнітного поля. Основними перевагами є відносна простота конструкції, перевірена технологія та висока ефективність. Однак контакт плазми зі стінками каналу призводить до їх ерозії, що зменшує ресурс двигуна.



Магнітно-екранований ХД ST-100M відрізняється використанням удосконаленої магнітної системи для зменшення впливу плазми на стінки каналу. Це значно знижує рівень ерозії, подовжуючи термін служби двигуна. Для розрахунку магнітної системи використовувалась програма ANSYS Maxwell, яка дозволяє моделювати розподіл магнітного поля в складних конструкціях та оптимізувати параметри магнітних котушок для досягнення максимального ефекту екранування.

Магнітно-екрановані двигуни мають низьку ефективність при роботі на малих витратах робочої речовини, що пов'язано зі зменшенням концентрації атомів при різкому розширенні розрядної камери, що призводить до зниження вірогідності іонізації. Тому їх дизайн вимагає додаткових досліджень для оптимізації геометрії розрядної камери з метою досягнення максимальної ефективності.

Порівняльний аналіз показує, що класичний ST-100 залишається оптимальним вибором для відносно короткострокових місій. У той же час ST-100M має значний потенціал для тривалих міжпланетних польотів, де надійність і довговічність є критично важливими.

Висновки. Магнітно-екранований двигун ST-100M демонструє суттєві переваги у довговічності завдяки зниженню ерозії стінок каналу. Це робить його перспективним для довготривалих місій, хоча особливості його роботи на зменшених витратах залишаються викликом. За допомогою розрахунків в ANSYS Maxwell вдалося значно покращити ефективність магнітного екранування, що дозволяє продовжити термін служби двигуна. Класичний ST-100, у свою чергу, продовжує бути надійним і економічним рішенням для місій з меншими вимогами до ресурсу. ST-100M доцільно використовувати в довготривалих місіях, де важлива довговічність та високий питомий імпульс. Якщо головною метою є досягнення віддалених цілей із тривалим часом польоту, ST-100M забезпечує оптимальне рішення. Натомість, для відносно короткотривалих місій, ST-100 є більш доцільним вибором.



Юрков Богдан ^{1,2}, Асмоловський Сергій ³, Вороновський Дмитро ^{1,2}, Троян Андрій ²,
Кулагін Сергій¹

¹науковий співробітник, доктор філософії, вчене звання, інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ, Дніпро, Україна, e-mail: yurkov.b.v@nas.gov.ua

²інженер-конструктор, SETS (Space Electric Thruster Systems), Дніпро, Україна, e-mail: bohdan.yurkov@sets.space

³аспірант, ДНУ ім.О. Гончара, Дніпро, Україна, e-mail: asmolovskiy.sergey@gmail.com

АНАЛІЗ РОБОТИ ХОЛЛОВСЬКОГО ДВИГУНА ST-40 З ВИКОРИСТАННЯМ КРИПТОНУ ТА КСЕНОНУ У ЯКОСТІ РОБОЧОЇ РЕЧОВИНИ

Анотація. У статті розглядається порівняння роботи Холловського двигуна ST-40 на криптоні та ксеноні. Проведено аналітичні розрахунки ефективності та характеристик двигуна, а також порівняння з експериментальними даними. Оцінено переваги та недоліки використання кожного газу, зокрема для космічних місій.

Ключові слова: Холловський двигун (ХД), ксенон, криптон, електрореактивна рушійна установка, плазма, вакуум, космос.

Вступ. Холловські двигуни є одним з найбільш ефективних варіантів електрореактивних двигунів, які використовуються в космічних апаратах для маневрування та корекції орбіти. Використання різних газів як робочих тіл у таких двигунах може значно вплинути на їхні характеристики, зокрема на тягу, ефективність та споживану потужність. Ксенон традиційно вважається основним газом для таких систем, однак його висока вартість та обмежена доступність стимулюють дослідження альтернативних газів, таких як криптон. Метою цієї роботи є порівняння характеристик Холловського двигуна ST-40 при використанні криптону та ксенону, зокрема на основі розрахункових та експериментальних даних.

Матеріал і результати досліджень. Для порівняння характеристик двигуна на криптоні та ксеноні були проведені аналітичні розрахунки, що враховують молекулярну масу, енергію іонізації та інші фізичні властивості кожного газу.

Ксенон має вищу молекулярну масу, що дозволяє отримати більшу тягу при меншій споживаній потужності порівняно з криптоном. Це зумовлено кращими характеристиками його іонізації та прискорення іонів, що підвищує загальну ефективність двигуна. З іншого



боку, криптон має значно нижчу вартість і є більш доступним, що робить його економічно вигідним варіантом для деяких застосувань.

Розрахунки показали, що при використанні криптону тяга на одиницю споживаної потужності є меншою, ніж при роботі з ксеноном. Це призводить до зниження ефективності двигуна, що особливо важливо для місій, де точність маневрування є критичною. Експериментальні данні показали, що різниця в характеристиках двигуна при роботі на цих газах є значною, але застосування криптону може бути доцільним для менш вимогливих завдань.

Висновки. Порівняння характеристик Холловського двигуна ST-40 при роботі на криптоні та ксеноні показало, що ксенон є більш ефективним газом для отримання високої тяги при менших значеннях споживаної потужності. Проте криптон, завдяки своїй доступності та економічним перевагам, може бути використаний у місіях, де не вимагається висока ефективність двигуна.

Для аналізу використано аналітичні розрахунки, що порівнюють параметри Холловського двигуна ST-40 на основі різних властивостей криптону та ксенону. Крім того, здійснено порівняння отриманих розрахункових результатів з експериментальними даними, що дозволяє оцінити точність теоретичних моделей та реальних результатів роботи двигуна на кожному з газів.



Трофімов Олександр¹

¹доцент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики,
кандидат фізико-математичних наук, доцент, Дніпровський національний
університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна, e-mail: atrof2222@gmail.com

БЛОЧНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ ПІДХІД В ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧАХ ЗНАХОДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОШАРОВИХ ОСНОВ

Анотація. запропонована методика отримання компонент градієнта функції нев'язки в обернених задачах визначення невідомих геометричних характеристик пружного багатошарового пакету. Суть метода полягає у певній параметризації відображень, що використовуються для формування регулярної сітки для кожного шару пакету. Для обчислення градієнту функції нев'язки застосовано метод спряженого стану.

Ключові слова: Шаруваті основи, Обернені задачі, Регулярні сітки, Метод спряженого стану, Блочно-параметричний підхід.

Вступ. Питання визначення геометричних параметрів багатошарових середовищ (товщин шарів, характеристик меж розділу суміжних шарів, межі розділу шаруватого пакета та середовища-основи тощо) має величезне теоретичне та практичне значення. З теоретичної точки зору аналіз параметрів шаруватого середовища зводиться до постановки та дослідження обернених задач, у яких вихідними даними є характеристики відгуку середовища на здійснені впливи, а також закони поширення збурень у середовищі (так звані «рівняння стану»). Результатом розв'язання таких обернених задач будуть як фізичні характеристики матеріалу шаруватого середовища (щільності, модулі пружності, коефіцієнти теплопровідності тощо), так і геометричні характеристики. У разі однорідних або майже однорідних шарів з фізичними параметрами, що істотно розрізняються, введення геометричних характеристик розділу шарів дозволяє суттєво знизити розмірність простору невідомих параметрів оберненої задачі, що значно спрощує її аналіз. Для аналізу подібних обернених задач важливу роль відіграє обчислення градієнта функції нев'язки в певній точці простору параметрів. Найбільш універсальним способом обчислення градієнта випробуваної функції служить метод, що використовує скінченно-різницеві апроксимації. Істотним його недоліком є висока трудомісткість: кількість розв'язань прямої задачі, необхідних для його реалізації, по порядку величини збігається з розмірністю простору параметрів, що моделюються. Крім того, такі методи вимагають визначення оптимального кроку чисельного диференціювання. Водночас у задачах



визначення розподілених полів параметрів пряме відображення зазвичай виражається як розв'язок крайової задачі для диференціального рівняння (або рівняння у частинних похідних) певного класу (так зване «рівняння стану»)[7]. Подібна інформація про пряме відображення дозволяє суттєво спростити (з точки зору обчислювальної трудомісткості) задачу знаходження градієнта. Метод спряженого стану [6] відноситься до класу таких методів, який дозволяє обчислити градієнт функції нев'язки, по суті, за одне розв'язання прямої задачі (точніше, певної лінеаризованої "спряженої" задачі, близької до вихідної прямої задачі). Метою роботи є побудова методів обчислення компонентів градієнта функції нев'язки у оберненій задачі визначення геометричних характеристик багат шарової основи на базі блочно-параметричного підходу, запропонованого у роботах [1-4].

Матеріал і результати досліджень. В якості «змінної стану» («фазової змінної») розглянемо вектор переміщень точок пружного багат шарового пакету (рис. 1)

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = (u_1(\mathbf{x}), u_2(\mathbf{x})) \in \mathbf{H}_U, \mathbf{x} \in \Omega,$$

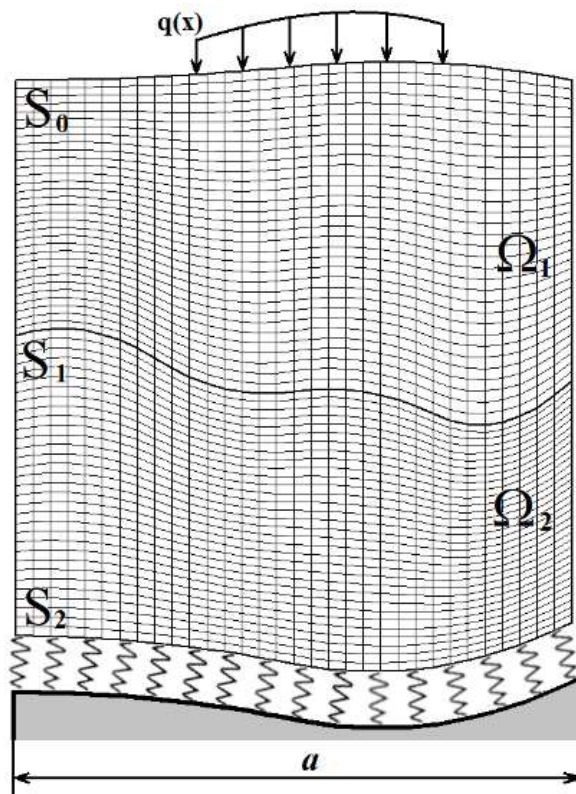


Рисунок 1 – Пружний шаруватий пакет з криволінійними межами та з побудованою регулярною сіткою.

а пряму задачу розглянемо у слабкому (варіаційному) формулюванні

$$\int_{\Omega} C_{ijkl} \varepsilon_{kl}(\mathbf{u}) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} d\Omega + \int_{S_K} \left(k_s u_n n_i v_i + G_s \frac{\partial u_n}{\partial s} \frac{\partial (n_i v_i)}{\partial s} \right) d(S_K) = \int_{\Omega} F_i v_i d\Omega + \int_{S_0} q_i v_i d(\partial\Omega_{\sigma}), \quad i = 1, 2, \forall \mathbf{v} = (v_1, v_2) \in H_{u0}$$



В якості вектору модельних даних оберненої задачі будемо використовувати вектор переміщень певних точок верхньої поверхні пакету.

Висновки. Виявлено, що задачею, спряженою до сформульованої прямої задачі, буде задача про дію зосередженої одиничної сили, прикладеної в точці поверхні, де задане спостережуване значення променевого переміщення, і діючої вздовж вектору променю сканування, на початкове слоїсте тіло (розташоване на початковій же пружній основі). Тобто, по суті, розв'язок є функцією Гріна (фундаментальним розв'язком) для прямої задачі. Відповідні компоненти градієнта (компоненти матриці Якобі прямого відображення) обчислюються як згортки

$$\langle \nabla \mathbf{G}_C, \delta \mathbf{S} \rangle = - \int_{\Xi} \frac{\partial}{\partial \mathbf{S}} \left(|J_{\xi}| C_{ijpq} \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}(\xi)) \frac{\partial \xi_r}{\partial x_q} \frac{\partial \lambda_p^*}{\partial \xi_r} \right) \delta \mathbf{S} d\Xi,$$

$$\langle \nabla \mathbf{G}_F, \delta \mathbf{S} \rangle = \int_{\Xi} \frac{\partial |J_{\xi}|}{\partial \mathbf{S}} F_i \lambda_i^* \delta \mathbf{S} d\Xi,$$

$$\langle \nabla \mathbf{G}_q, \delta \mathbf{S} \rangle = \int_{\xi_{10}^{(0)}}^{\xi_{11}^{(0)}} \frac{\partial |J_{S_{0\xi}}|}{\partial \mathbf{S}} q_i \lambda_i^* \delta \mathbf{S} d\xi_1,$$

$$\langle \nabla \mathbf{G}_{k_s}, \delta \mathbf{S} \rangle = - \int_{\xi_{10}^{(K)}}^{\xi_{11}^{(K)}} k_s \frac{\partial}{\partial \mathbf{S}} \left(|J_{S_{K\xi}}| (n_i u_i) (n_j \lambda_j^*) \right) \delta \mathbf{S} d\xi_1,$$

$$\langle \nabla \mathbf{G}_{G_s}, \delta \mathbf{S} \rangle = - \int_{\xi_{10}^{(K)}}^{\xi_{11}^{(K)}} G_s \frac{\partial}{\partial \mathbf{S}} \left(\frac{1}{|J_{S_{K\xi}}|} \frac{\partial (n_i u_i)}{\partial \xi_1} \frac{\partial (n_j \lambda_j^*)}{\partial \xi_1} \right) \delta \mathbf{S} d\xi_1.$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Трофімов, О., & Сохацький, А. (2022). Моделювання в транспортних технологіях. Частина I. Дніпро: УМСФ.
2. Трофімов, А. (2020). Аналіз розв'язування обернених задач для оцінки структурно-функціональних характеристик дорожніх одягів. Проблеми обчислювальної механіки та міцності споруд, (31), 100-131.
3. Trofimov A. (2021). Inverse Problem Analysis for nondestructive evaluation of structural characteristics of multilayered foundations. Arch Appl Mech (91), 1773–1792.
4. Trofimov A. (2024). Block-parametric approach to non-destructive control data analysis of railroad layered foundations. MATEC Web Conf 390 04003.



В.С. Дорошенко

пров. наук. співр., д. т. н., с. н. с., Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна, e-mail: doro55v@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ МЕТАМАТЕРІАЛІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ ПОЛІМЕРНИХ ЛИВАРНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ

Анотація. Показано моделювання полімерних та металевих виробів із пористих метаматеріалів за алгоритмом від компанії Spherene Inc. (Швейцарія) у середовищі Rhinoceros. Поєднання можливостей регулювання його характеристик і створення за принципом теорії тривимірних мінімальних поверхонь перспективне для 3D-друку легковагих полімерних ливарних моделей, які газифікуються у піщаній формі при виготовленні металевих виливків.

Ключові слова: 3D-друк, ливарна модель, газифікація моделі, spherenes, ЛГМ.

Вступ. В процесі пошуку матеріалу для легковагих разових моделей для ЛГМ-процесу (лиття металу за моделями, що газифікуються) привернув увагу алгоритм від компанії Spherene Inc. (Швейцарія, <https://spherene.ch>), який ґрунтується на створенні так званих «адаптивних поверхонь мінімальної щільності» (Adaptive Density Minimal Surfaces, ADMS) у пористому метаматеріалі [1, 2]. Такий підхід дозволяє оптимізувати розподіл матеріалу, забезпечуючи самопідтримку структури під час його 3D-друку. Метаматеріалами (Metamaterials) називають штучні матеріали з незвичайними фізичними властивостями, що не зустрічаються у природних матеріалах. Цей алгоритм цифрового дизайну метаматеріалу проходить стадію патентування [1] і ще не застосовувався в ливарному виробництві. Він досліджується нами для мінімізації маси та керування властивостями матеріалу 3Dдрукованих моделей [3] і наразі проходить стадію випробувань. Алгоритм базується на математичній теорії тривимірних мінімальних поверхонь (МП) та біонічному наслідуванні деяких структур коралів з адаптацією до діючого програмного забезпечення Rhinoceros для 3D-моделювання [1, 2].

Матеріал і результати досліджень. На рис. 1 показано приклади 3D-друкованих виробів полімерних типу корала та структури кістки (а) і металевих кронштейнів (б) (з сайту <https://spherene.ch>). Кронштейни було надруковано для космічного обладнання [1].



Подібною структурою внутрішньої серцевини ливарних моделей ми прагнемо замінити пінополістирол (ППС), виробництво моделей з якого зазвичай потребує складних металевих прес-форм.



Рисунок 1 - Приклади 3D-друкованих полімерних (а) та металевих виробів (б)

На рис. 2 показано спроектовану нами модель настінного гачка з пористими стінками (а), надруковані нами на принтері типу «BABbu Lab A1 mini» (для дослідження можливості заповнення стінок моделі) три елементи пористої структури (б) за програмою [2] та за іншими програмами - зразки порувато-сітчастих структур, зокрема кулька для пінг-понгу (в).

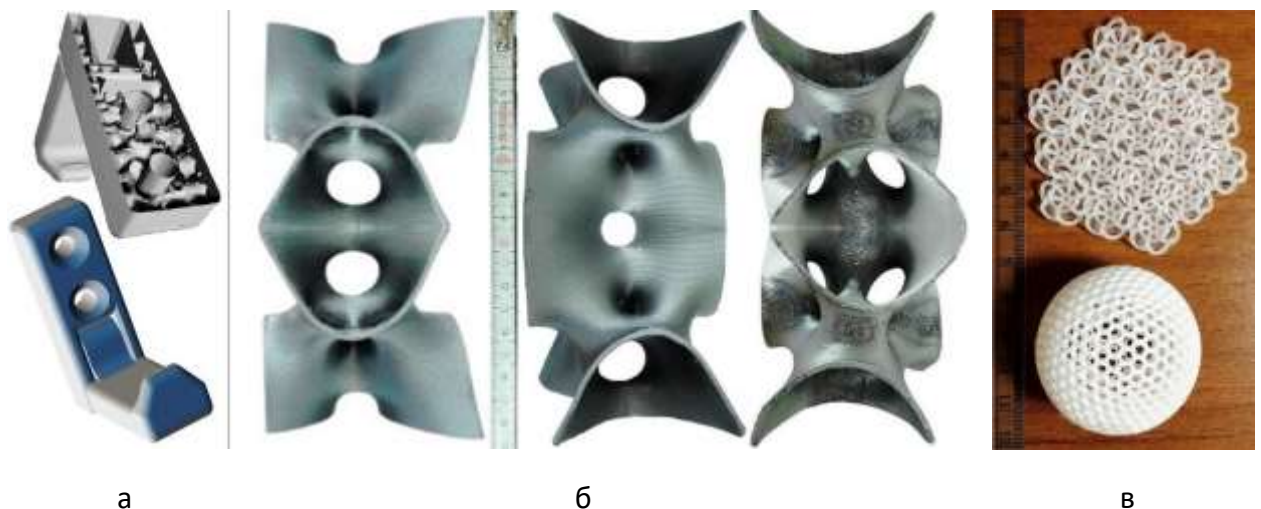


Рисунок 2 – Моделювання гачка з пористими стінками (а), 3D-друковані полімерні елементи пористої структури (б) та легковагі вироби з комірчастою структурою (в)

Висновки. З метою переведення матеріалу ливарних пористих моделей з традиційного ППС на друкований піно-полімер досліджено метод їх проектування на основі метаматеріалу від компанії Spherene Inc. Подальший розвиток теми полягає в адаптації режиму виливання металовиробів із газифікацією друкованих моделей у

піщаній формі. При цьому на цифрових кресленнях моделі доцільно проектування спрямованої (транзитної) пористості для керованої газифікації моделі з виводом газів крізь випори за межі форми чи в пісок форми, що має екологічний ефект. 3D-друк без модельної оснастки дозволяє з цифрового файлу виробляти полімерні моделі практично за лічені години, що на порядок скоротить тривалість підготовки до виробництва нових виливків і особливо ефективно для разового та дрібносерійного виробництва, що відповідатиме концепціям «виробництво як послуга» (Manufacturing as a Service, MaaS) та «виробництво на вимогу» (On-Demand manufacturing).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hendrixson, S. (2024). Metamaterial With Geometry Derived From Spheres. *Additive Manufacturing*, (May), 40.
2. SphereneRHINO Public Beta Documentation. (2023). Retrieved from <https://spherene.ch/documentation/sphereneRHINO/>.
3. Бродовий, О. В., Дорошенко, В. С., & Янченко, О. Б. (2024). 3D-проекування пористих ливарних моделей в програмі Rhinoceros 8. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, (1), 119-126.



Раздобреєв Валерій¹, Ключніков Кирило², Паламар Дмитро³, Лещенко Олександр⁴,
Іванов Олександр⁵

¹с.н.с., к.т.н., с.н.с., Інститут Чорної Металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м.
Дніпро, Україна, e-mail: v_razdobreev@ukr.net

²м.н.с., Інститут Чорної Металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро,
Україна, email: kirill.shaman.k@gmail.com

³м.н.с., Інститут Чорної Металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро,
Україна, email: damjan@i.ua

⁴м.н.с., Інститут Чорної Металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро,
Україна, email: leschenko.a.73@gmail.com

5

пров. інженер, к.т.н., доц., Інститут Чорної Металургії ім. З.І. Некрасова НАН
України, м.

Дніпро, Україна, e-mail: iva.dnp@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МЕТАЛУ ПРИ ЗНАКОЗМІННОМУ ДЕФОРМУВАННІ ШТАБИ В ЗГИНО- РОЗТЯГУВАЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ

Анотація. В роботі, за допомогою розробленої в Інституті чорної металургії математичної моделі напружено-деформованого стану штаби, яка піддана холодному знакозмінному деформуванню при її протяжці через згино-розтягувальний пристрій з максимальним переміщенням натискного ролику показано, що величини стискаючих та розтягуючих напружень, які формуються на поверхні штаби не досягають значень границі плинності металу.

Ключові слова: напруження, згино-розтягувальний пристрій, знакозмінна деформація.

Вступ. Процес прокатки-волочіння застосовується для виробництва різного ряду фасонних профілів складної конфігурації, у тому числі тонкостінних, стрічкових і профілів періодичного перерізу [1]. Цей процес в порівнянні з процесом волочіння у монолітних волоках дозволяє на 20-40 % зменшити енергетичні витрати, збільшити інтенсивність одиничних деформацій до 40-50 %, скоротити кількість підготовчих операцій (термообробка, травлення і нанесення мастильного шару), виключити застосування дорогих волочильних мастил [2]. В порівнянні з холодною прокаткою профілів процес прокатки-волочіння має більшу технологічну гнучкість та не потребує



суттєвих капітальних витрат при організації виробництва точних профілів, у тому числі стрічкового типу. Однак наявність тягового зусилля обмежує сортамент профілів, що виготовляються за компактністю їх поперечного перерізу. Так при виробництві профілів стрічкового типу з співвідношенням ширини до товщини більш 1,5-2 у зв'язку наявності напружень, що розтягують, змінюється напружено-деформований стан в об'ємі осередку деформації та зменшується пластичність металу майже до нуля, а профіль по кромкам руйнується.

Так, наприклад, в процесі холодного волочіння дроту в результаті складної дії пластичної деформації, тертя металу об стінки волоки і технологічних чинників у готовому виробі виникають внутрішні залишкові напруження. Встановлено, що ці напруження в периферійному шару дроту є розтягуючі, а в центральному – стискаючі [3, 4]. Щоб усунути шкідливий вплив розтягуючих залишкових напружень, необхідно або їх зменшити, або перевести в стискаючі напруження, які підвищують працездатність дроту. З цією метою в практиці дротового виробництва застосовують два способи: термічний і механічний. Перший полягає в низькотемпературній відпустці (при $+250...+350\text{ }^{\circ}\text{C}$) або індукційному нагріванні поверхні дроту. Цей спосіб, який широко застосовується в промисловості, потребує значних витрат енергії. Другий має кілька різновидів, з яких найбільш раціональний є правка металу у холодному стані за допомогою, наприклад, обладнання для рихтування профілів або окалинозламувача. В процесі правки при протягуванні дроту через систему обертових роликів дрот піддається змінному згину, відчуючи пружно-пластичну деформацію, в результаті якої змінюється напружений стан дроту. В результаті згинів дроту при правці відбувається зміна напруженого стану дроту, при якому зменшуються або нівелюються шкідливі залишкові напруження розтягнення в поверхневому шарі дроту і виникають залишкові напруження стиску, що призводить до значного підвищення працездатності дроту і виробів з неї. Застосування знакозмінного згину при виробництві профілів стрічкового типу волочінням в роликівих волоках дозволить отримувати більш рівномірний розподіл напруженого стану металу, а також нівелювати розтягуючі напруження на крайках готового профілю. Це в свою чергу дозволить підвищити якість і геометричні розміри профілів стрічкового типу, що виробляються. Поєднання цих двох процесів холодного деформування: прокаткиволочіння у роликівих волоках і правки профілів стрічкового типу через роликівий згино-розтягувальний пристрій дозволить комплексно вирішувати проблему забезпечення вітчизняних машинобудівних і приладобудівних підприємств точними профілями широкого розмірного сортаменту.



Матеріал і результати досліджень. Для проведення знакозмінної деформації металу згином з розтягуванням використовували одноплощинний трьохроликовий згиннорозтягувальний пристрій (ЗРП) з вертикальним розташуванням роликів. Трьохроликовий

ЗРП мав наступні параметри: діаметр роликів $D_p = 36$ мм; відстань між осями роликів $L = 35$ мм; кількість роликів пристрою, $n = 3$; величина переміщення осі натискного ролика Δt від 2 до 8 мм; матеріал роликів Ст. 40Х. Матеріал заготовки висотою $h = 5,20$ мм та шириною $b = 6,15$ мм – Ст. 08А з такими властивостями: початкова границя плинності металу $\sigma_{T0} = 530$ Н/мм² і початкова границя міцності металу $\sigma_{B0} = 553$ Н/мм². За допомогою розробленої в ІЧМ математичної моделі [5] провели обчислювальний експеримент по визначенню напруженого стану металу від величини переміщення натискного ролику Δt в трьохроликовому ЗРП у процесі знакозмінного деформування штаби. Результати моделювання наведено на рис. 1.

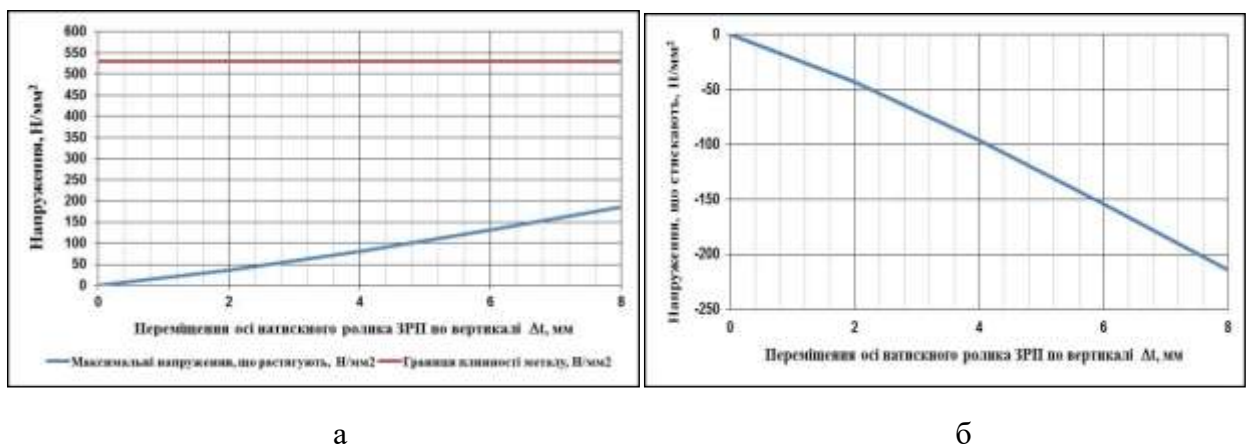


Рисунок 1 – Залежності зміни максимальних значень напружень, що розтягують (а) та стискають (б) при знакозмінному деформуванні штаби перерізом 5,20х6,15 мм в трьохроликовому ЗРП від величини переміщення осі натискного ролика по вертикалі Δt

З рисунка видно, що зі збільшенням величини переміщення осі натискного ролика по вертикалі Δt від 2 до 8 мм спостерігається закономірне збільшення максимальних значень напружень, що розтягують (рис. 1а) та стискають (рис. 1б) при знакозмінному деформуванні штаби в трьохроликовому ЗРП. За результатами математичного моделювання процесу знакозмінного деформування штаби в трьохроликовому ЗРП при переміщенні осі натискного ролика по вертикалі Δt на 8 мм встановлено, що максимальні значення напружень, що розтягують дорівнюють $+186$ Н/мм², а які стискають дорівнюють -214 Н/мм². При цьому розрахункові максимальні значення напружень, що



розтягують та стискають не досягають значення границі плинності металу, яке становить 530 Н/мм^2 після деформування у двовалковій роликовій волоці з гладкими валками.

Висновки. Математичне моделювання показало, що деформація штаби в ЗРП формує максимальні числові значення напружень на поверхні штаби, що розтягують і стискають та не досягають значення границі плинності металу. Подальші дослідження впливу знакозмінного вигину на деформаційні і технологічні параметри процесу волочіння профілів стрічкового типу в роликових волоках дозволять комплексно вирішувати проблему забезпечення машинобудівних і приладобудівних підприємств точними профілями широкого розмірного асортименту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ключников К.Ю., Воробей С.А., Раздобреєв В.Г., Сикачина І.В. (2014). Ефективність виробництва особливоточних фасонних профілів малих перерізів у роликових волоках із заготовок круглого перерізу. У Пластична деформація металів. (т. 1. с. 159-163).
2. Razdobreev, V. G., Kluychnikov, K. Yu., Leschenko, A. I., Palamar, D. G., and Vorobei, S. O. (2023). Production Efficiency of Ribbon-Type Sections by the Drawing Method in Doubled-Roll Roller Dies. Sci. innov., 19(6), 40-50.
3. Житков Д.Г., Поспехов І.Т. (1953). Сталеві канати для підйомно-транспортних машин. - М.: Металлургиздат.
4. Перлін, І.Л. (1957). Теорія креслення - Москва: Металлургиздат.
5. Раздобреєв В.Г., Ключніков К.Ю., Лещенко О.І., Паламар Д.Г. (2023). Математичне моделювання процесу отримання профілів стрічкового типу з круглої заготовки. У ПРОБЛЕМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ. (с. 55-57).



Рудавський Денис¹, Силованюк Віктор²

¹ професор, д.т.н., с.н.с., НУ “Львівська політехніка”,
Львів, Україна, e-mail: rudavskyy@gmail.com

² зав. відділу, д.т.н., професор, Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка
НАН України, Львів, Україна, e-mail: vsylovanyuk@gmail.com

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗМІЦНЕННЯ ПОШКОДЖЕНОГО ТРІЩИНАМИ БЕТОННОГО ПЕРЕКРИТТЯ ЗА ІН’ЕКЦІЙНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

Анотація. Запропоновано методику аналітичного розрахунку ресурсу міцності бетонного перекриття із залікованою за ін’екційними технологіями тріщиною. Методом скінченних елементів (МСЕ) із високою точністю підтверджено узгодженість числових даних із аналітичною оцінкою міцності.

Ключові слова: бетонне перекриття, поверхнева тріщина, ін’екційна технологія, коефіцієнт інтенсивності напружень, метод скінченних елементів.

Вступ. Бетонні конструкції у вигляді циліндричних елементів є одними із поширених у будівельній практиці. Такі конструкції використовують для різного роду укриттів, складів великої площі, тунелів, мостів та інших будівельних споруд спеціального призначення (рис.1). Під час експлуатації такі об’єкти можуть зазнавати пошкоджень тріщинами під впливом різних факторів. Одним із сучасних методів “заліковування” пошкоджених ділянок є ін’екційні технології відновлення їх роботоздатності [1]. Для оптимізації технології інектування та встановлення ресурсу міцності відновлених споруд необхідно розв’язувати задачі про напружено-деформований стан в тілах із тріщинами заповненими ін’екційними матеріалами, що пов’язано із значними математичними труднощами. В даній роботі пропонується наближений підхід до розв’язання такої задачі, що дозволив отримати інженерні формули для розрахунку із прийнятною точністю залишкового ресурсу міцності циліндричного перекриття з тріщиною.



Рисунок 1 – Приклади об’єктів з циліндричними елементами конструкцій



Матеріал і результати досліджень. Розглянемо довге циліндричне бетонне перекриття під навантаженням власної ваги та зовнішнього вертикального рівномірно розподіленого зусилля інтенсивності p , що забезпечує умови реалізації стану плоскої деформації перекриття (рис. 2). На основі побудованої скінченно-елементної моделі встановлено розподіл напружень у перекритті. Визначено площину перерізу А-А стінки циліндричного бетонного перекриття, де діють максимальні зсувні напруження $\tau_{\max}$ та їх величину (рис. 3). В цій площині найбільш ймовірні виникнення та ріст тріщини зсуву.

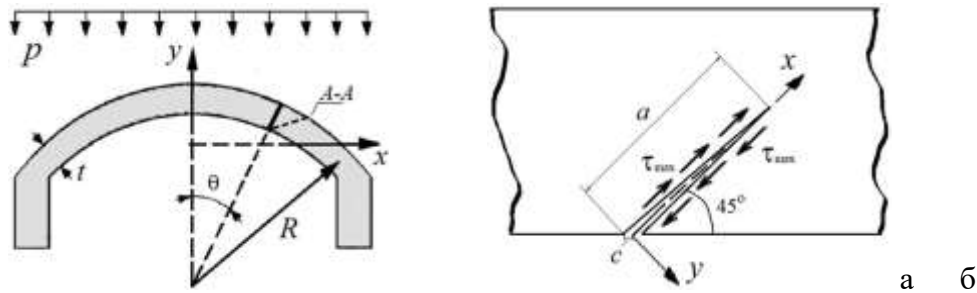


Рисунок 2 – Схематичне зображення перерізу циліндричного бетонного перекриття (а) та його фрагменту з тріщиною (б)

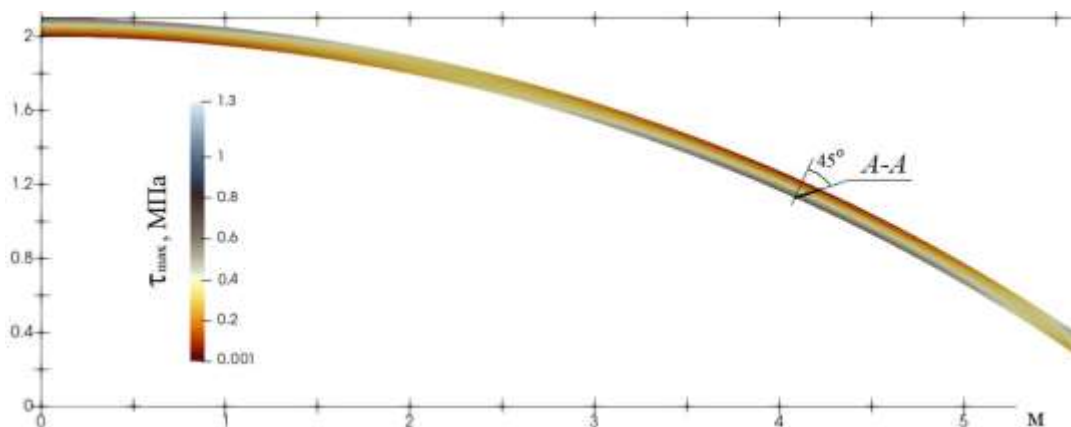


Рисунок 3 – Отриманий методом МСЕ розподіл максимальних дотичних напружень $\tau_{\max}$ в поперечному перерізі циліндричного бетонного перекриття

На основі відомих аналітичних розв'язків для тіла із тонкими еліптичними включеннями [2] та низки гіпотетичних припущень отримано формулу для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_{II} в околі контура крайової заповненої ін'єкційним матеріалом тріщини

$$K_{II} = \frac{1,237\tau_{\max} \cdot (1 - E_2/E_1) \sqrt{2t \cdot \operatorname{tg}(\pi a/2t)}}{1 + c^{-1}a(1 - \nu)E_2/E_1}, \quad (1)$$

де E_1 , E_2 – модулі Юнга основного та ін'єкційного матеріалів.



Результати розрахунку КІН K_{II} для заповненої крайової тріщини методом МСЕ із високою точністю та за наближеною формулою (1) показано на рисунку 4.

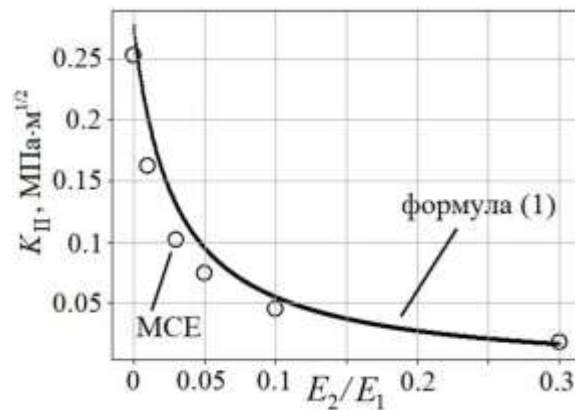


Рисунок 4 – Зіставлення результатів обрахунку КІН K_{II} в околі залікованої тріщини

Враховуючи залежність (1) та встановлений МСЕ при заданих параметрах навантаження для даного перекриття зв'язок $\sigma_{\max} = 195,027 p + 0,4585$ (МПа), граничне навантаження $p_{\square}$ для цієї конструкції із залікованим дефектом можна розрахувати за формулою

$$p_{*} = 4,145 \cdot 10^{-3} \frac{K_{IIc} (1 + a(1 - \nu) E_2 / (c E_1))}{(1 - E_2 / E_1) \sqrt{2t} \cdot \operatorname{tg}(\pi a / 2t)} - 2,351 \cdot 10^{-3} \text{ (МПа)}. \quad (2)$$

Висновки. Отримані в роботі наближені формули розрахунку КІН та граничного навантаження у циліндричному бетонному перекритті показали добру узгодженість із високоточним числовим розв'язком цієї задачі, отриманим методом МСЕ. Результати обрахунків показали зниження КІН, а отже збільшення граничного навантаження для ін'єкційно заповненої тріщини більше ніж у два рази у порівнянні із незаповненою тріщиною за співвідношення модулів пружності наповнювача до основного матеріалу лише 0,03 (рис. 4), що відповідає заліковуванню тріщини в бетоні поліуретаном.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Panasyuk, V., Marukha, V., & Sylovanyuk, V. (2014). Injection Technologies for the Repair of Damaged Concrete Structures. Dordrecht–Heidelberg–New York–London: Springer.
2. Панасюк, В., Стадник, М., & Силованюк, В. (1986). Концентрація напружень у тривимірних тілах з тонкими включеннями. К.: Наук. думка.

Дослідження проведені в рамках виконання гранту Національного фонду досліджень України № 2023.04/0132



Кравчук Леонід¹, Карпінос Борис², Буйських Костянтин³

¹провідний науковий співробітник, д. т. н., проф, Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна, e-mail: 7lvk@ukr.net

²завідувач відділу, д. т. н., проф, Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН

України, Київ, Україна, e-mail: karpinos@ipp.kiev.ua

³заступник директора Інституту з наукової роботи, к. т. н., ст.н.с., Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна, e-mail: bkr@ipp.kiev.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ СТАНІВ МАТЕРІАЛУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОН КОНСТРУКЦІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Анотація. Наведено методологію і результати моделювання несталих і неоднорідних термодинамічних станів матеріалу небезпечних зон конструктивних елементів, що інтенсивно циклічно нагріваються за час експлуатації. Стисло описано експериментальні газодинамічні стенди, які є Національним надбанням України. Показано вплив експлуатаційних і технологічних чинників, а також конструкторських рішень на термоміцність і довговічність матеріалів.

Ключові слова: моделювання, газодинамічні стенди, тепловий та термонапружений стани матеріалу, термоміцність, довговічність.

Вступ. Відтворення в зразку або моделі стану матеріалу, що тотожний стану конструкції, було і залишається проблемою при експериментальних дослідженнях термоміцності і довговічності. Складність розв'язання проблеми полягає в потребі одночасного забезпечення в дослідках не тільки відповідних параметрів термодинамічного стану матеріалу (температури, компонент напружень і деформацій, їхніх похідних у часі і простору), але і впливу різних технологічних і експлуатаційних чинників. Стосовно елементів, що експлуатуються в високотемпературному, хімічно агресивному газовому середовищі, ця проблема почалася вирішуватися в Україні школою ПисаренкаТретьяченка. Було виконано теоретичні і експериментальні дослідження термоциклічної довговічності конструктивних елементів з використанням моделей простої і спеціальної форми. Розміри моделі обиралися таким чином, щоби за циклічного нагрівання її локальний стан в небезпечній зоні був тотожний стану об'єкту досліджень. Використовувалися зразки у вигляді пластин, циліндрів, клинів тощо.



Ґрунтуючись на аналітичних розв'язках задач несталої теплопровідності і термопружності побудовано номограми теплових і термонапружених станів моделей. Циклічні нагрівання моделей здійснювалися газовим потоком з високими термодинамічними параметрами на створеному газодинамічному стенді. Результати досліджень засвідчили перспективність такого підходу до прогнозування довговічності жароміцних сплавів, керамічних і композитних матеріалів. Помітне місце зайняли дослідження композиційних систем зі спеціально орієнтованою структурою, якими, зокрема є направлено кристалізовані (монокристалічні) сплави і жаростійкі покриття. З ними пов'язаний прогрес у сучасному газотурбобудуванні. Дуже плідною в питаннях впровадження захисних покриттів була співпраця з українськими конструкторами авіаційної та ракетнокосмічної техніки.

Матеріал і результати досліджень. Здобутки в методах вимірювання і реєстрації параметрів дослідів, моделюванні фізичних процесів, сучасні комп'ютерні технології сприяють подальшому розвитку цього напрямку і дозволяють суттєво підвищити науково-технічний рівень досліджень, розширити номенклатуру виробів і матеріалів, врахувати вплив раніше не контрольованих чинників. Контроль і реєстрація температури робочих середовищ і об'єктів дослідження здійснюється термопарами і пірометром інфрачервоного випромінювання «Infratherm IGA 140» з відповідним програмним забезпеченням InfraWin. Універсальний інформаційновимірювальний комплекс забезпечує обробку сигналів від первинних джерел, моніторинг інформації та подання її у вигляді табличних і ілюстративних даних на ПЕОМ. Передбачено можливість синхронного вимірювання температур (6 каналів), деформацій за допомогою тензорезисторів (4 канали), лінійних переміщення (3 канали) і тисків (3 канали). Типові зразки і моделі для експериментальних досліджень термоциклічної довговічності наведено на рис. 1



Рисунок 1 – Зразки і моделі для експериментального дослідження



Розв'язано мультифізичні задачі рухомого середовища і твердого тіла щодо аналізу термодинамічного стану елементів конструкцій і моделей, в яких збурюються тотожні стани. В якості прикладу на рис. 2 наведено результати розв'язання задач течії, теплообміну, теплопровідності і термопружності для небезпечних зон охолоджуваних лопаток газових турбін.

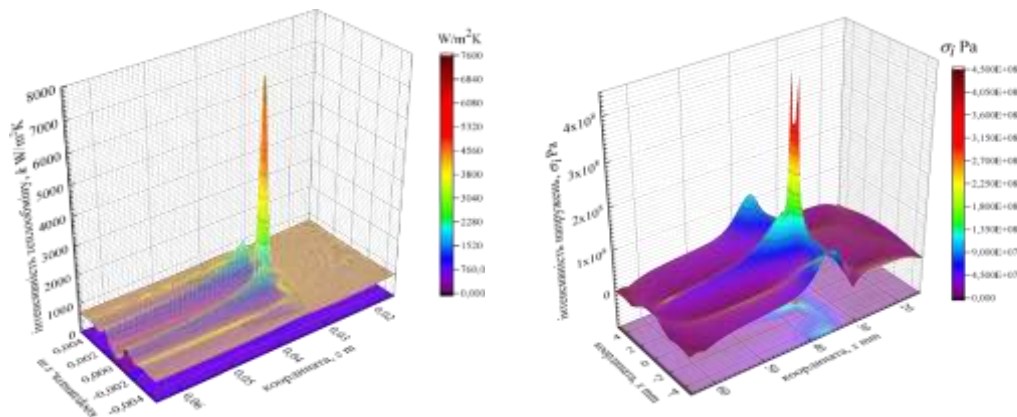


Рисунок 2 – Розподіли інтенсивності теплообміну і напружень на поверхні моделі

Ознакою руйнування (граничного стану) моделі або елемента конструкції приймається поява тріщини певної довжини, відшаровування термозахисного покриття, змінення геометрії і розмірів, втрата маси та інші. Статистична обробка результатів експериментів визначає їхню достовірність і коректність. В залежності від мети досліджень експериментальні результати подаються у вигляді гістограм довговічності, регресійних рівнянь утоми $N = f(\sigma_l, \epsilon_l, T)$. Наприклад для жароміцних сплавів –

$$N = A\sigma_l^m, N = B\epsilon_l^n, N = B\epsilon_l^n T^l, N = B(\epsilon_l \exp(C \text{grade} \epsilon_l))^n,$$

де N – довговічність, σ_l, ϵ_l – компоненти напружень і деформацій, T – температура, A, B, C, n, m, l – емпіричні сталі. Визначено вплив деградованого поверхневого шару та тріщин термічної втоми елементів конструкцій газотурбінних двигунів на їхній тепловий і напружено-деформований стан. Металографічні дослідження дозволили встановити особливості механізмів деформування матеріалу при термоциклічному навантаженні. Показана необхідність враховування цих чинників при прогнозуванні міцності і довговічності матеріалу небезпечних зон конструкцій.

Для теплового захисту елементів ракетно-космічної техніки крім механічних характеристик важливими показниками є зміна локальної геометрії елемента і температури в різних точках внаслідок аеродинамічного нагрівання. Використання композиційних армованих матеріалів при створенні елементів ускладнює розрахункове і



експериментальне розв'язання проблеми. Кожний окремий матеріал, конструкторське рішення та програма термічного навантаження пов'язані з модернізацією і удосконаленням методичних підходів. Ці обставини враховано при розробці методики дослідження абляційного теплового захисту. Ґрунтуючись на виконаних експериментальних дослідженнях встановлено базові параметри компонентів паливо-повітряної суміші на газодинамічному стенді, що забезпечують відтворення на поверхні покриття температури, характерної для експлуатаційної. Узагальнено особливості його роботоздатності при випробуваннях в умовах, що моделюють експлуатаційні, під час аеродинамічного теплового навантаження. Отримані результати дозволили сформулювати рекомендації розробникам для удосконалення теплозахисного покриття.

Висновки. Засвідчено ефективність застосування методів розрахунково-експериментального моделювання стану матеріалу в процесі дослідження його термоміцності і термічної втоми. Запропоновані методи на відміну від існуючих дозволяють при прогнозуванні граничного стану матеріалу або несівної здатності елементів конструкції диференційовано враховувати вплив експлуатаційних, технологічних чинників та конструкторських рішень на процеси накопичення пошкоджень в матеріалі.



В. В. Кривда¹, Ф. І. Абрамчук², О. П. Сакно³, В. Є. Олішевська⁴, К. І. Корніленко⁵

¹завідувач кафедри автомобілів та автомобільного господарства, канд. техн. наук,
доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства, НТУ «Дніпровська
політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: krivda.v.v@nmu.one

²професор кафедри автомобілів та автомобільного господарства, доктор техн. наук,
професор кафедри двигунів внутрішнього згорання, НТУ «Дніпровська політехніка»,
Дніпро, Україна, e-mail: abramchuk.f.i@nmu.one

³доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства, канд. техн. наук,
доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, НТУ «Дніпровська політехніка»,
Дніпро, Україна, e-mail: sakno.o.p@nmu.one

⁴доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства, канд. техн. наук,
доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства, НТУ «Дніпровська
політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: olishevskaya.v.ye@nmu.one

⁵асистент кафедри автомобілів та автомобільного господарства, НТУ «Дніпровська
політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: kornilenko.k.i@nmu.one

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ У ПОРШНЕВИХ ДВИГУНАХ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

Анотація. В роботі проведено дослідження перспектив використання в поршневих двигунах гібридних енергоустановок таких видів альтернативних палив, як біодизель, водень та метанол, з точки зору енергоефективності, економічної доцільності та зменшення екологічного навантаження. Виконано математичне моделювання роботи поршневого двигуна на різних видах альтернативних палив з урахуванням граничних умов тиску, температури та хімічного складу.

Ключові слова: альтернативні палива; поршневі двигуни гібридних енергоустановок; енергоефективність; економічна доцільність; екологічне навантаження.

Вступ. Сучасні поршневі двигуни внутрішнього згорання, які широко використовуються в транспортних засобах та промислових енергоустановках, працюють здебільше на паливах, спалювання яких супроводжується значними викидами вуглекислого газу (CO₂), окисів азоту (NO_x) та сажі. Забруднення навколишнього середовища прийняло такі масштаби, що спричиняє глобальне потепління, кислотні дощі та інші екологічні проблеми [1]. Аналітичний огляд наукової літератури показує, що сьогодні одними з найбільш перспективних палив можна вважати альтернативні палива: біодизель, водень та метанол [2]-[5].



Метою роботи є дослідження перспектив використання в поршневих двигунах гібридних енергоустановок альтернативних палив з точки зору енергоефективності, економічної доцільності та екологічного навантаження.

Матеріал і результати досліджень. Гібридний режим роботи двигуна передбачає поєднання енергії від поршневого двигуна та електричної установки, що вимагає адаптації паливної системи для ефективної взаємодії компонентів.

Для дослідження перспектив використання в поршневих двигунах гібридних енергоустановок альтернативних палив було проведено математичне моделювання роботи поршневого двигуна на різних видах палива з урахуванням граничних умов тиску, температури та хімічного складу. Рівняння енергії згорання палива описується формулою:

$$Q = m \cdot H_u \cdot \eta, \quad (1)$$

де: Q – загальна теплова енергія, що виділяється під час згорання (Дж); m – маса палива (кг); H_u – нижня теплота згорання палива (Дж/кг); η – ефективність згорання, яка враховує втрати тепла та недоспалювання палива.

Питомі витрати палива (SFC , кг/кВт·год) розраховуються наступним чином:

$$SFC = \frac{m}{P \cdot t}, \quad (2)$$

де: P – потужність двигуна (кВт); t – час роботи на обраному паливі (год).

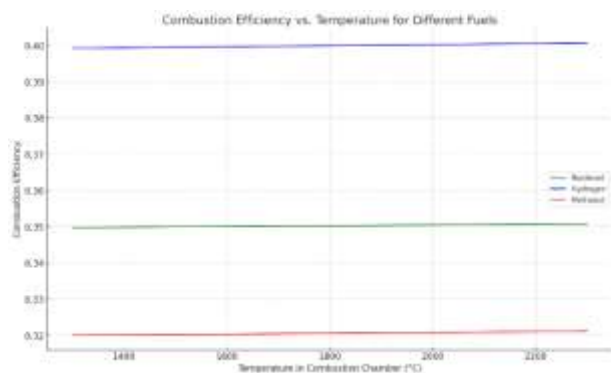
Рівень викидів можна розрахувати як функцію від коефіцієнта надлишку повітря (λ) та температури згорання. Наприклад, для CO_2 рівень викидів може бути описаний наступним рівнянням [6]:

$$E_{CO_2} = k \cdot \frac{m \cdot C}{M}, \quad (3)$$

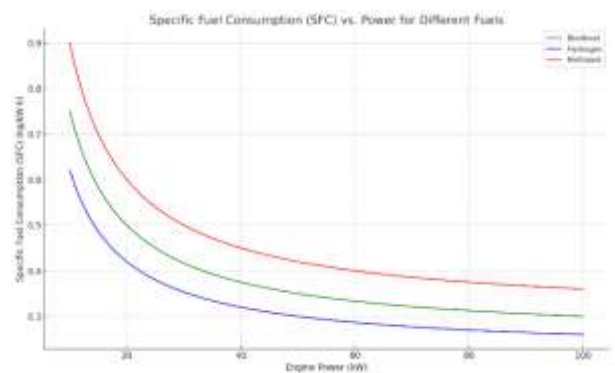
де: E_{CO_2} – маса викидів CO_2 ; k – коефіцієнт, що залежить від повного згорання; C – вміст вуглецю в паливі; M – молекулярна маса палива.

Результати дослідження представлені на рис. 1: ефективність згорання різних палив при зміні температури в камері згорання (рис. 1, а), питомі витрати палива для кожного виду альтернативного палива в залежності від потужності двигуна (рис. 1, б), рівні викидів CO_2 та NO_x в залежності від типу палива та коефіцієнта надлишку повітря λ (рис. 1, в).

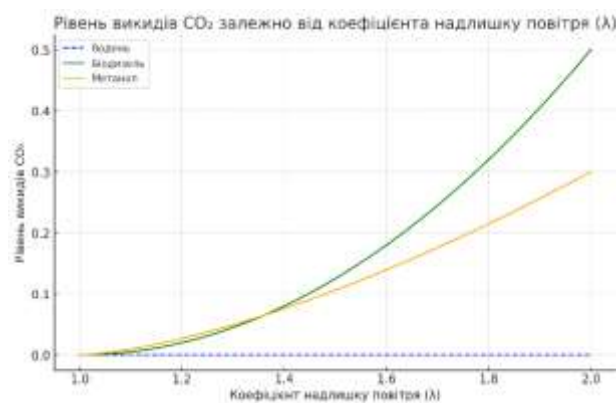




а



б



в

Рисунок 1 – Порівняння ефективності згорання (а), питомих витрат палива (б) та рівня викидів CO_2 (в) для різних видів альтернативних палив у поршневих двигунах

Висновки. Результати дослідження показують, що використання водню забезпечує нульові викиди CO_2 , високу паливну економічність і покращені показники продуктивності, що робить його оптимальним для екологічно орієнтованих застосувань. Метанол, завдяки своїм властивостям, забезпечує компроміс між екологічністю і вартістю, тоді як біодизель виступає надійним варіантом для двигунів, де важлива стабільність та висока енергетична густина палива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кривда, В. В., Сакно, О. П., Олішевська, В. Є. (2024). Обґрунтування нейронного способу контролю виду живлення ДВЗ в залежності від умов роботи. *Автошляховик України*, 4, 15-22. DOI: 10.33868/0365-8392-2024-4-281-15-22 .
2. Demirbas, A. (2007). Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy*, 35(9), 4661-4670. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.04.003 .



3. Alptekin, E., & Canakci, M. (2009). Characterization of the key fuel properties of methyl ester–diesel fuel blends. *Fuel*, 88(1), 75-80. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.05.023 .
4. Basha, S. A., Gopal, K. R., Sargunam, J. (2009). A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1628-1634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.031> .
5. Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094-11111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035> .
6. Wouters, C. G. L., Burkardt, P., Steeger, F., Fleischmann, M., Pischinger, S. (2023). Comprehensive assessment of methanol as an alternative fuel for spark-ignition engines. *Fuel*, 340(5), 127627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127627> .



Беднюк О.В.

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail:

bedniuk.o.v@nmu.one, alexandr.bednyuk@gmail.com

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СУМІСНОЇ РОБОТИ СИСТЕМ ПИЛОВЛОВЛЮВАННЯ І ВЕНТИЛЯЦІЇ МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ ПРИ РОБОТІ ПРОХІДНИЦЬКОГО КОМБАЙНА

Анотація. Запропонована методика оцінки ефективності сумісної роботи систем пиловловлювання і вентиляції місцевого провітрювання на основі процесів формування рудникової атмосфери у привибійному просторі при роботі прохідницького комбайну.

Методика дозволяє швидко отримати результати та приймати обґрунтовані рішення щодо управління системами знепилювання повітря у привибійному просторі, що сприяє аерологічній безпеці на робочих місцях.

Ключові слова: пилоутворення, методика оцінки сумісної роботи систем, повітряні течії, відбійка гірських порід, умови праці, дрібнодисперсний пил.

Запропонована методика оцінки ефективності сумісної роботи систем на основі урахування процесів формування рудникової атмосфери у привибійному просторі при роботі прохідницького комбайну є ефективним інструментом для таких умов, оскільки вона проста у використанні, вимагає мінімальних ресурсів та надає зрозумілі результати. Ця методика базується на адаптації сумісної роботи систем знепилювання до сучасних способів і схем провітрювання з урахуванням пилової динаміки через визначення ефективних параметрів сумісної роботи систем пиловловлювання і місцевої вентиляції прохідницьких вибоїв, які можуть бути виконані за допомогою доступних інструментів, таких як Excel або безкоштовні статистичні програми, що робить її доступною навіть для підприємств без спеціалізованих знань у статистиці. З однієї сторони, відношення $Q_{\text{наг.}}/Q_{\text{всм.}}$ є інтуїтивно зрозумілим показником, який легко інтерпретувати, що дозволяє керівництву швидко отримувати результати та приймати обґрунтовані рішення, але з другої сторони це відношення має значний вплив на аеродинаміку вентиляційних потоків у привибійному просторі при суміщеній роботі систем пиловловлювання та вентиляції, яким зрештою визначається їх ефективність, то його можна назвати «вентиляційним критерієм», який позначимо літерою B .



Метою дослідження є оцінка ступеня впливу кількості повітря, що подається у вибій на рівень запиленості рудникового повітря в гірничій виробці при використанні пиловловлювальних систем. Для цього використовуються дві змінні:

- кількість свіжого повітря, що подається по нагнітальному трубопроводу вентилятором місцевого провітрювання ($Q_{наг.}$);
- кількість повітря, що всмоктується пиловловлювальною системою ($Q_{всм.}$).

Ці змінні поєднуються критерієм B

$$B = \frac{Q_{наг.}}{Q_{всм.}}$$

Якщо критерій $B > 1$, то частина запиленого рудникового повітря не потрапляє в пиловловлювач, а виноситься активним струменем далі по гірничій виробці. При цьому утворюються вентиляційні потоки, що забезпечують необхідну швидкість повітря, передбачену ПБ (не менше 0,15 м/с). Тому такий варіант сумісної роботи вентиляційної системи і системи пиловловлювання є позитивним з точки зору санітарії та безпеки праці (відсутні такі негативні чинники, як рециркуляція повітряних потоків і застійні зони з нульовою швидкістю повітря). Але при цьому варіанті деяка кількість дрібнодисперсного пилу розповсюджується по всій довжині тупикової виробки. За умови якщо критерій $B = 1$, то все повітря, що надходить у вибій, буде забиратися системою пиловловлювання і в цьому випадку стан рудникової атмосфери буде визначатися виключно значенням критерію очищення від пилу η_{ϵ} . Згідно з літературними джерелами [1], ефективність пиловловлювальних систем знаходиться в межах 0,7...0,93. За умови, якщо прийняти значення $\eta_{\epsilon} = 0,93$, то по всій довжині тупикової виробки (починаючи від вихлопного отвору пиловловлювача), вихідний вентиляційний потік буде очищеним від дрібнодисперсних фракцій пилу. Але в частині привибійного простору від всмоктуючого патрубку пиловловлювача до його вихлопного отвору, швидкість повітря дорівнюватиме близько до нуля, тобто ця частина виробки фактично не провітрюватиметься. Тому в цьому просторі, де присутня електроенергія і відсутній контроль метану стаціонарними датчиками системи АГК, виникає застійна зона (позначена червоним кольором), в якій висока вірогідність підвищення концентрації метану (утворення місцевих, шарових скупчень). Цей фактор є дуже вагомим для газових шахт. Для негазових шахт ця частина привибійного простору є дискомфортною з точки зору кліматичних умов.

При $B < 1$ (тобто витрата пиловловлювача більше кількості повітря, що надходить у вибій), то система пиловловлювання буде всмоктувати не тільки повітря з привибійного простору, а й частину повітря що виходить з вихлопного отвору пиловловлювача, тобто



буде виникати рециркуляція повітря. У цьому випадку, як і в попередньому, знепилювання повітря становитиме практично 100%, але за рахунок явища рециркуляції, у просторі між всмоктуючим патрубком пиловловлювача та патрубком вихлопу очищеного повітря, може бути підвищеною концентрація метану. Таким чином, аналіз сумісної роботи систем пиловловлювання і вентиляції свідчить про те, що ефективна робота пиловловлювача буде можлива тільки при виконанні умови $B > 1$ (тобто витрата пиловловлювача менше кількості повітря, що надходить у вибій). Збільшення кількості повітря, що надходить у вибій, призведе до винесення пилу та непотрапляння його в пиловловлювач. Отже, різниця між значеннями параметрів $Q_{наг.}$ і $Q_{всм.}$ повинна бути мінімальна. Ця величина визначається з умов вимог правил безпеки, за якими необхідно забезпечити рух повітря у гірничій виробці з мінімально допустимою швидкістю. Згідно з [2] швидкість повітря в приви́бійному просторі; приймається 0,5 м/с (для температури повітря в приви́бійному просторі +24°C і відносної вологості повітря 80 %). Мінімальна швидкість повітря в гірничій виробці згідно з [2] дорівнює 0,25 м/с. З урахуванням вищевикладеного, вентиляційний критерій B , за умови відсутності рециркуляції та з максимально можливим забором запиленої атмосфери, може бути визначений наступним чином:

$$B = \frac{Q_{наг.}}{Q_{всм.} + Q_{вир. min}} = 1,$$

де $Q_{вир. min.}$ – мінімальна кількість повітря, для провітрювання виробки, м³/с;

$$Q_{наг.} = v_{наг.} S_{наг.} = v_{наг.} \frac{\pi d_{наг.}^2}{4},$$

де $v_{наг.}$ – середня швидкість руху повітря у нагнітальному повітроводі, м/с; $S_{наг.}$ – площа перерізу нагнітального повітровода, м²; $d_{наг.}$ – діаметр нагнітального повітроводу, м; $Q_{всм.}$ – кількість повітря, що забирається системою пиловловлювання, м³/с;

$$Q_{всм.} = v_{всм.} S_{всм.} = v_{всм.} \frac{\pi d_{всм.}^2}{4},$$

де $v_{всм.}$ – середня швидкість руху повітря на всмоктуванні у пиловловлювача, м/с; $S_{всм.}$ – площа перерізу всмоктувального патрубка пиловловлювача, м²; $d_{всм.}$ – діаметр всмоктувального патрубка пиловловлювача, м.

$$Q_{вир. min} = v_{вир. min} \cdot S_{вир.} = v_{вир. min} \cdot (b \cdot h),$$



де $v_{вир. min}$ – мінімальна допустима швидкість руху повітря, м/с; b і h – ширина і висота гірничої виробки, м.

Отже, найбільш ефективним буде рішення, що враховує вентиляційний критерій представлений в наступному вигляді

$$B = \left\{ \frac{Q_{наг}}{Q_{всм} + Q_{вир. min}} = 1 \right.$$

Або в розгорнутому виді, для використання в комп'ютерному моделюванні

$$B = \left\{ \frac{v_{наг} \pi d_{наг}^2}{4 \left[v_{всм} \frac{\pi d_{всм}^2}{4} + v_{вир. min} (b \cdot h) \right]} = 1 \right.$$

Результати дослідження підтверджують ефективність використання вентиляційного критерію B для аналізу сумісної роботи систем знепилювання, що може бути корисним у практичній діяльності з управління роботою сумісних систем місцевого провітрювання і пилевловлювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A Guide to Spray Technology for Dust Control. Spraying Systems Co. 2008. Bulletin 652. 20 p.



СЕКЦІЯ 4. ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРЕСИВНИХ ТА НЕТРАДИЦІЙНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА ВИРОБНИЦТВІ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.

Чопорова О. В., Чопоров С. В., Грищак Д. В.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОМБІНАЦІЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ТА КОНІЧНОЇ ОБОЛОНОК З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

В авіаційній, автомобільній техніці та космічних конструкціях поширене використання об'єктів, що можуть бути представлені як комбінації оболонок циліндричної та конічної форми. При проектуванні таких конструкцій виникає необхідність прогнозування напружено-деформованого стану оболонок. Використання чисельних методів дозволяє отримати адекватну модель напружено-деформованого стану з потрібною точністю, але побудова відповідних моделей є тривалою за часом. Проте процес проектування має інтерактивний характер та потребує ухвалення рішень у процесі змін конструкції. Для забезпечення інтерактивності проектування можливо використовувати нейронні мережі, які після тривалого етапу глибокого навчання дозволяють отримувати прогнозні значення майже миттєво.

З розвитком інформаційних систем та комп'ютерних наук використання машинного навчання для прогнозування зон руйнування в інженерних конструкціях стає все більш популярним та затребуваним завдяки своїй швидкодії у порівнянні з натурними експериментами. Також важливим фактором є фінансова складова, яка є набагато меншою. Наприклад, у роботі [1] досліджено можливості нейронних мереж для прогнозування максимальних переміщень у залізничних балках. Модель нейронної мережі побудовано як функцію двох змінних: фрикційного параметру та швидкості навантаження. Для навчання використано 663 точки, що дозволило отримати максимальну похибку відносно скінченно-елементної моделі у 5,4%. Модель нейронної мережі для прогнозування критичного навантаження (у контексті втрати стійкості) двотаврової балки з отворами розроблено у роботі [2]. Розроблена модель враховує сім геометричних параметрів і дозволяє обчислити критичне навантаження з точністю у межах від 3,7% до 0,4% за час, менший однієї мілісекунди. У роботі [3] розроблено нейронну мережу, яка базується на фільтрі Калмана (англ. Kalman filter), для



прогнозування руйнування швидкісної дороги на мосту шляхом обробки даних про температуру та коливання. У роботі [4] для прогнозування руйнування за даними про вібрації розроблено модель на основі самоорганізаційної карти Кохонена (англ. Self-organizing map).

Модельно конструкція представляється комбінацією двох оболонок товщини h , r_0 – радіус циліндричної частини, r_1 – менший радіус конічної частини (рис. 1), $l_{cylinder}$ – довжина циліндричної частини, l_{cone} – довжина конічної частини, E – модуль Юнга конструкції, ν – коефіцієнт Пуассона конструкції, q – інтенсивність зовнішнього тиску.

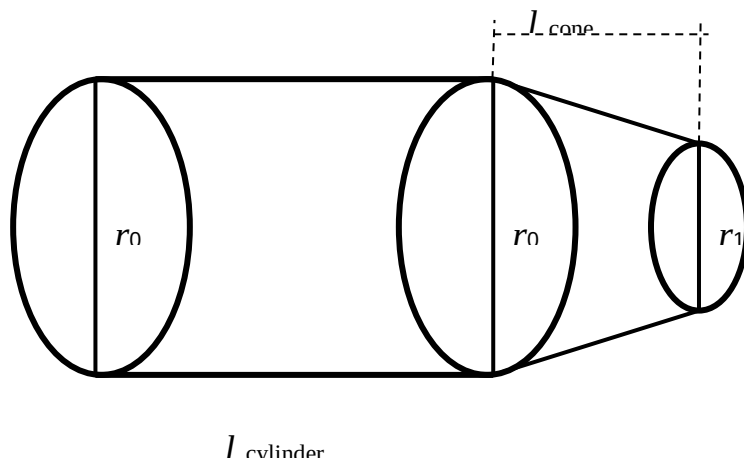


Рисунок 1 - Модель конструкції для навчання нейронної мережі

Для навчання нейронної мережі виконується серія комп'ютерних експериментів з моделювання напружено-деформованого стану оболонок із ізотропного матеріалу з наступними параметрами:

$$\begin{aligned} r_0 &\in [1; 3] \text{ (м)}; \\ r_1 &\in [0.1; 0.5] \text{ (м)}; \\ l_{cone} &\in [2; 4] \text{ (м)}; \\ l_{cylinder} &\in [5; 7] \text{ (м)}; \\ h &\in \left[\frac{r_0}{100}; \frac{r_0}{20}\right] \text{ (м)} [127]; \\ E &\in [50000; 300000] \text{ (МПа)}; \\ \nu &\in [0; 0.45]; \\ q &\in [0.001; 0.1] \text{ (МПа)}. \end{aligned}$$

Можливі умови закріплення генеруються випадково, також умови закріплення є даними категорій. Можливі наступні випадки умов закріплення: вільні краї,



підтримувані краї або зафіксовані краї. Можлива будь-яка комбінація, виключаючи ситуації з двома вільними краями.

Результати кожного експерименту зберігаються у базу даних. Наприклад, у результаті генерації даних на множині з 26700 вузлів та 26600 елементів отримали наступні результати (рис. 2-4):

$$r_0 = 1.8991808043792844$$

$$r_1 = 0.213331504072994$$

$$l_{conr} = 3.858336561359465$$

$$l_{cylinder} = 6.0348932249471545$$

$$h = 0.020135312849976893$$

$$E = 288684.7013258375$$

$$\vartheta = 0.16687570314388722$$

$$q = -0.04492475583637134$$

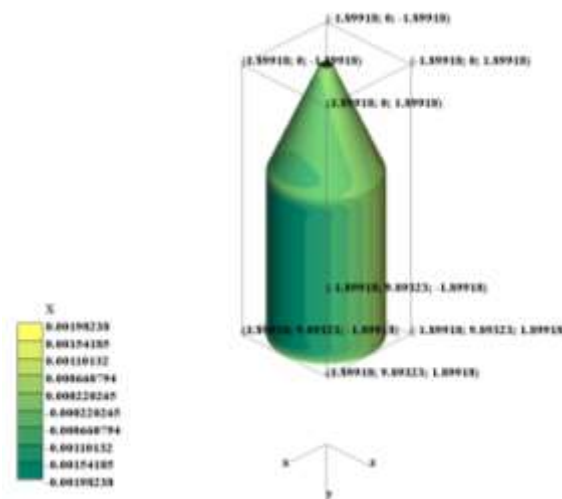


Рисунок 2 – Зміна значень по x в об'єднанні оболонок



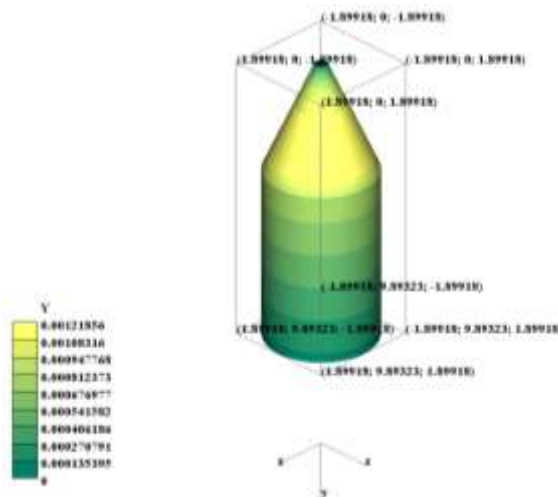


Рисунок 3 – Зміна значень по y в об'єднанні оболонок

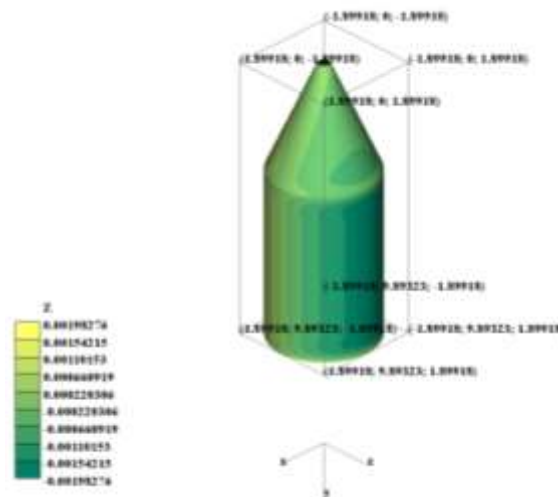


Рисунок 4 - Зміна значень по z в об'єднанні оболонок

Для машинного навчання розроблено багатошарову нейронну мережу, яка має наступний вигляд (рис. 5):



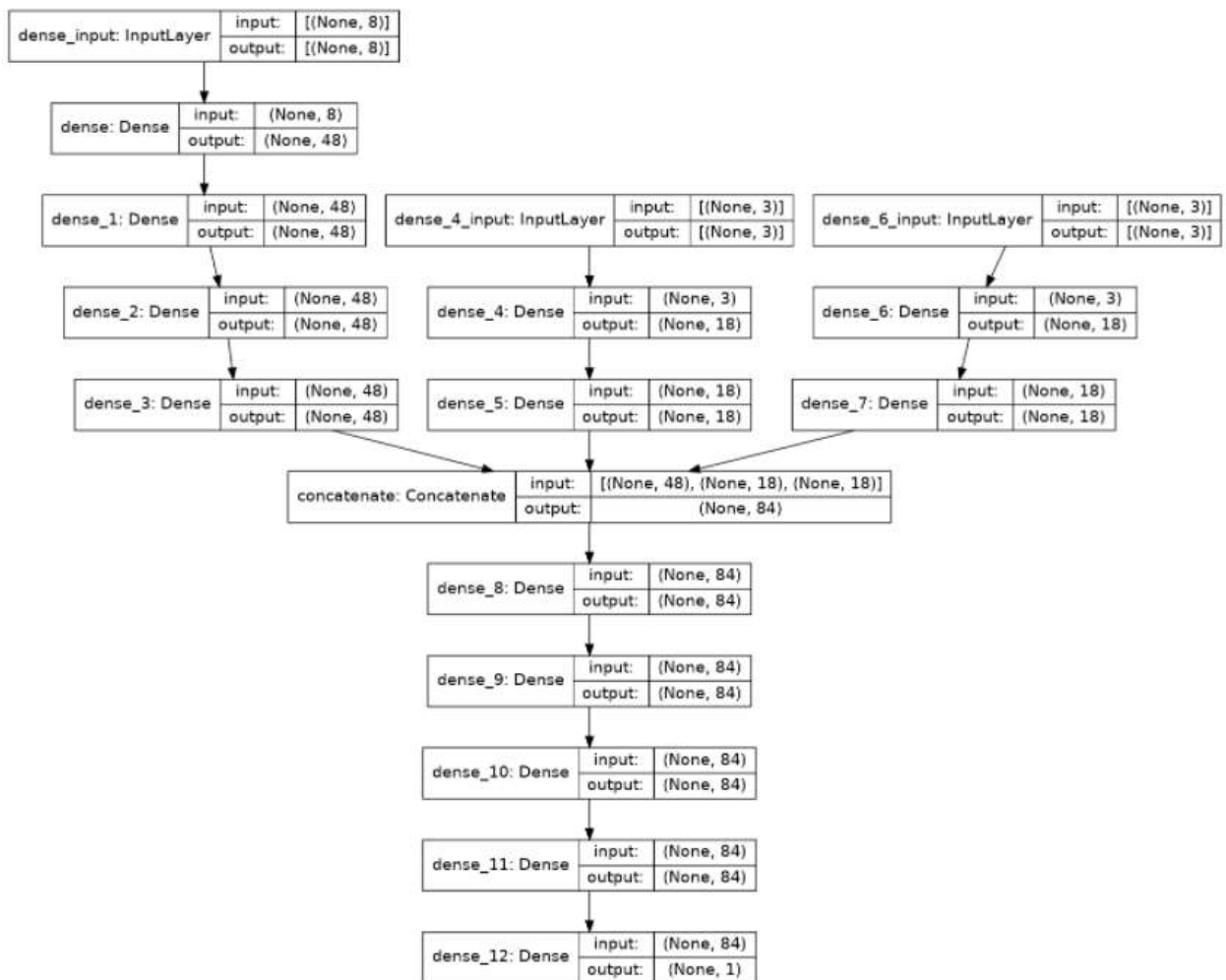


Рисунок 5 - Модель нейронної мережі

Вхідний шар поділений на 3 гілки. До першої гілки відносяться числові дані, тобто вхідний зовнішній шар містить 8 нейронів. Друга та третя гілки – дані категорій. Дані категорій – умови закріплення країв оболонки, тобто можливі випадки вільних країв, затиснутих або підтримувані краї. У другій та третій гілках вхідні шари містять по 3 нейрони. Кожна гілка має приховані внутрішні шари. У першій – 4 приховані шари по 48 нейронів у кожній. У другій та третій – по 2 шари з 18 нейронами. Потім відбувається об'єднання трьох гілок і отримуємо внутрішній шар з 84 нейронами. Нейронна мережа має ще 4 внутрішні приховані шари по 84 нейрони у кожному. На виході маємо 1 зовнішній шар з 1 нейроном.

Обчислювальний експеримент проведений на 1000 епохах показав наступні результати (рис. 5, 6):



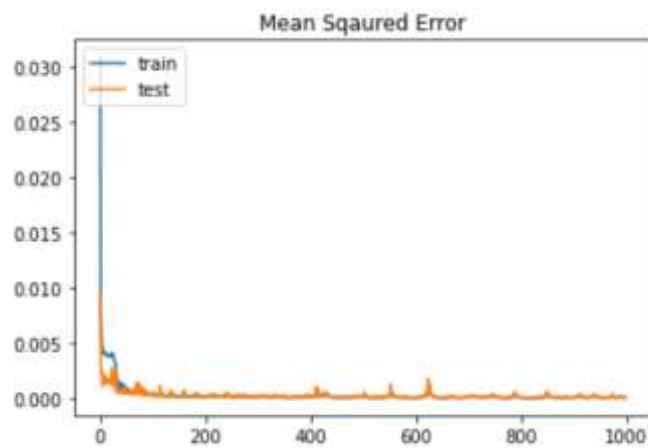


Рисунок 5 - Середньоквадратична похибка

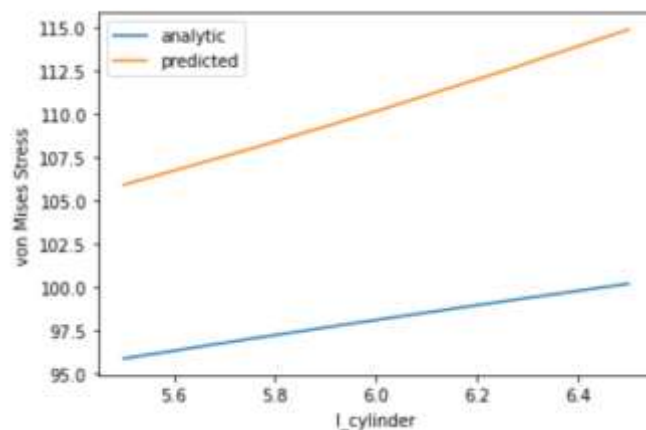


Рисунок 6 - Значення інтенсивності напружень за Мізесом

Отже, під час дослідження були розроблені алгоритми генерації даних для оболонок. Проведено обчислювальні експерименти з базовими архітектурами нейромереж. Проаналізовано вплив функцій активації та алгоритмів активації на штучні нейронні мережі. Проведені дослідження на вплив кількості нейронів та прихованих шарів на нейромережеве прогнозування напружено-деформованого стану оболонок.

Розроблено нейронну мережу для прогнозування напружено-деформованого стану об'єднання циліндричної та конічної оболонок з довільними умовами закріплення.

Виявлено, що розроблені нейронні мережі дозволяють прогнозувати значення напружено-деформованого стану з похибкою приблизно 10% відносно аналітичного рішення.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Potential of neural networks for maximum displacement predictions in railway beams on frictionally damped foundations / M. Abambres, R. Corrêa, A. P. Da Costa, F. Simões // engrXiv. 2019. URL: <https://engrxiv.org/m3b7j/>. DOI: 10.31224/osf.io/m3b7j
2. Neural Network-based formula for the buckling load prediction of I-section cellular steel beams / M. Abambres, K. Rajana, K. Tsavdaridis, T. Ribeiro // engrXiv. 2018. URL: <https://engrxiv.org/wg7hd/>. DOI: 10.31224/[osf.io/wg7hd](https://engrxiv.org/wg7hd/)
3. Damage detection of a highway bridge under severe temperature changes using extended Kalman filter trained neural network / C. Jin, S. Jang, X. Sun [et. al] // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2016. Vol. 6, Iss. 3, P. 545–560.
4. Onur Avci P. O., Abdeljaber A. O. Self-Organizing Maps for Structural Damage Detection: A Novel Unsupervised Vibration-Based Algorithm // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2016. Vol. 30, Iss. 3. P. 1–11.
5. Hertzmann A, Fleet D. Machine Learning and Data Mining, Lecture Notes CSC 411/D11, Computer Science Department, University of Toronto, Canada (2012).
6. McCulloch WS, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5(4):115–133 (1943).
7. Hern A. Google says machine learning is the future. Available at: www.theguardian.com/technology/2016/jun/28/all.
8. Choporova O., Lisnyak A. “Using machine learning to predict the stress-strain state of a rectangular plate with a circular cut-out” CEUR Workshop Proceeding s. 2020. T. 2791. C. 1-6. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85098720535&origin=resultslist>
9. Keras. URL: <https://www.tensorflow.org/guide/keras>.
10. Abambres M., Marcy M., Doz G. “Potential of Neural Networks for Structural Damage Localization”, engrXiv. 2018. URL: Available: engrxiv.org/rghpf/ doi: 10.31224/osf.io/rghpf.
11. Chollet. F., et al. Keras. 2015. Available at: <https://github.com/fchollet/keras>



Гоменюк С.І.¹, Панасенко Є.В.²

¹декан математичного факультету, д.т.н., професор, Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна, e-mail: gserega71@gmail.com

²доцент кафедри фундаментальної та прикладної математики, к.ф.-м.н., доцент, Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна, e-mail: panasenkoyevgeniy@gmail.com

ВЕБРЕАЛІЗАЦІЯ ПОСТПРОЦЕСОРА З ВІДКРИТИМ ПОЧАТКОВИМ КОДОМ

Розглядається задача розробки відокремлених програмних систем у вигляді вебзастосунків з відкритим початковим кодом для автоматизації постаналізу результатів чисельних розрахунків, отриманих у сторонніх системах скінченно-елементного аналізу.

Ключові слова: метод скінченних елементів, WebGL, вебзастосунок, проєктування, візуалізація.

Вступ. Заміна фізичних випробувань віртуальним комп'ютерним експериментом є одним з найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності проєктування сучасної техніки, оскільки це дозволить істотно пришвидшити й здешевити процес розробки, а також зробити її більш безпечною. На сьогодні для комп'ютерного моделювання широкого кола проблем найбільш часто використовується чисельний метод скінченних елементів [1]. Його застосування потребує наявності спеціалізованого програмного забезпечення – систем скінченно-елементного аналізу, які можуть бути умовно поділені на три основні підсистеми: 1) препроцесор, що автоматизує підготовку даних для розрахунку (в першу чергу, створення скінченно-елементної моделі), 2) процесор, який безпосередньо здійснює всі розрахунки, і 3) постпроцесор, що автоматизує аналіз отриманих результатів.

Практичний досвід показує, що етап аналізу чисельних результатів (постобробка) за своєю складністю та тривалістю може значно перевищувати дві попередні стадії чисельного моделювання. Отже, від якості реалізації постпроцесора та зручності його використання інженером напряду залежить ефективність автоматизованого проєктування. Переважна більшість сучасних постпроцесорів є невід'ємними складовими відповідних систем скінченно-елементного аналізу (наприклад, Ansys [2], MSC Nastran [3], COMSOL [4] та ін. [5]). Це фактично робить неможливим їх використання спільно зі сторонніми програмами, орієнтованими на розв'язання певних вузьких класів задач (наприклад, механіки композитів). Крім того, останнім часом



швидкими темпами розвиваються хмарні технології, що вимагає створення відповідного програмного забезпечення, реалізація якого у вигляді вебзастосунків дозволить досягти реальної багатоплатформності, оскільки сучасні браузері фактично є апаратно незалежними віртуальними машинами, що працюють майже на всіх типах сучасної комп'ютерної техніки. Саме тому розробка відокремлених програмних систем для автоматизації постаналізу результатів чисельних розрахунків, отриманих у різних системах чисельного моделювання у вигляді вебзастосунків з відкритим початковим кодом, на сьогодні є актуальною задачею.

Програмна реалізація постпроцесора. Найбільш поширеним способом постобробки результатів розрахунку є перетворення числових даних у графічні зображення, наочні для користувача. На сьогодні існує велика кількість способів візуалізації результатів розрахунку, наприклад, побудова дво- та тривимірних графіків, ізоліній, кольорових карт розподілу шуканої функції по поверхні об'єкта моделювання тощо. Для створення тривимірних графічних сцен у вебзастосунках використовується сучасна технологія WebGL [6], яка працює спільно з вбудованою мовою програмування JavaScript [7] у графічному елементі HTML5 Canvas. Для відображення за допомогою WebGL будь-якого об'єкта, в першу чергу, потрібно на спеціалізованій мові програмування GLSL [8] створити дві програми – вершинний та піксельний шейдери, які вбудовуються у скрипт на мові JavaScript, що безпосередньо реалізують візуалізацію графічної сцени. Вершинний шейдер описує процедуру rasterizaції, тобто перетворення фізичних координат об'єкта у екранні, а піксельний – обчислення кольору кожного пікселя (наприклад, з урахуванням положення джерела освітлення).

Для побудови кольорової карти розподілу обраної користувачем функції по поверхні досліджуваного об'єкта було реалізовано відповідний алгоритм для довільного трикутного граничного елемента. Для реалізації графічного інтерфейсу користувача у вебзастосунку було використано JavaScript-бібліотеку з відкритим початковим кодом React [9], яка забезпечує високу швидкість роботи, є кросплатформною і такою, що легко масштабується. Крім того, за допомогою React можна створювати складні інтерфейси з маленьких ізольованих компонентів, що дозволяє легко розширювати функціональність вебзастосунку.

Висновки. У роботі представлено програмну реалізацію постпроцесора Mesh [10] з відкритим початковим кодом, якій можна використовувати для аналізу результатів скінченно-елементних розрахунків, отриманих з використанням низки сторонніх FEA-систем. Головною перевагою програми Mesh у порівнянні з наявними аналогами є її



реалізація у вигляді вебзастосунку, що робить її кросплатформною та такою, що може працювати з використанням сучасних хмарних технологій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Sixth edition. Butterworth-Heinemann, 2016, 753 p.
2. Engineering Simulation & 3D Design Software | Ansys. URL: <https://www.ansys.com/> (дата звернення: 08.03.2025).
3. MSC Nastran – Multidisciplinary Structural Analysis. URL: <http://surl.li/schezo> (дата звернення: 08.03.2025).
4. COMSOL Multiphysics ® Modelling Software. URL: <https://www.comsol.com/> (дата звернення: 08.03.2025).
5. Finite element analysis software. URL: <http://surl.li/ukbjyp> (дата звернення: 08.03.2025).
6. WebGL Overview – The Khronos Group Inc. URL: <https://www.khronos.org/webgl/> (дата звернення: 08.03.2025).
7. Home – Ecma International. URL: <https://ecma-international.org/> (дата звернення: 08.03.2025).
8. WebGL Fundamentals. URL: <https://webglfundamentals.org/> (дата звернення: 08.03.2025).
9. React. URL: <https://react.dev/> (дата звернення: 08.03.2025).
10. Mesh. URL: <https://surl.li/vnpczu> (дата звернення: 08.03.2025).



Чеберячко Ю.І.¹, Терещук О.В.²

¹професор, доктор технічних наук, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м.

Дніпро, Україна, e-mail: Cheberiachko.yu.i@nmu.one

²асистент кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail:

Tereshchuk.O.V@nmu.one

МЕТОДИКА ОЦІНКИ РИЗИКІВ НА ОСНОВІ КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ: ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ МАЛИХ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація. Запропонована методика оцінки ризиків на основі коефіцієнта кореляції Пірсона є ефективним інструментом для невеликих підприємств. Методика дозволяє швидко отримати результати та приймати обґрунтовані рішення щодо управління ризиками, що сприяє стабільності підприємства.

Ключові слова: управління ризиками, методика оцінки ризиків, коефіцієнт кореляції Пірсона, оцінка ризику, кореляційний аналіз, статистичні розрахунки, прогнозна модель.

Управління ризиками є критично важливим для невеликих підприємств, які часто мають обмежені ресурси та високу чутливість до зовнішніх та внутрішніх загроз. Запропонована методика оцінки ризиків на основі коефіцієнта кореляції Пірсона є ефективним інструментом для таких підприємств, оскільки вона проста у використанні, вимагає мінімальних ресурсів та надає зрозумілі результати. Ця методика базується на базових статистичних розрахунках, які можуть бути виконані за допомогою доступних інструментів, таких як Excel або безкоштовні статистичні програми, що робить її доступною навіть для підприємств без спеціалізованих знань у статистиці. Коефіцієнт кореляції Пірсона є інтуїтивно зрозумілим показником, який легко інтерпретувати, що дозволяє керівництву швидко отримувати результати та приймати обґрунтовані рішення.

Метою дослідження є оцінка ступеня впливу кількості небезпек на рівень ризику.

Для цього використовуються дві змінні:

- Незалежна змінна (X): Кількість небезпек.
- Залежна змінна (Y): Оцінка ризику.



Для збору даних не потрібні дорогі дослідження або спеціалізоване програмне забезпечення. Дані можуть бути зібрані внутрішніми силами підприємства, що значно зменшує витрати. Методика дозволяє швидко отримати результати, що є важливим для невеликих підприємств, які часто працюють у умовах обмеженого часу. Для проведення дослідження необхідно зібрати репрезентативну вибірку даних, яка включає значення кількості небезпек та відповідні оцінки ризику. (Перекуда, Капустян, & Курилко, 2022)

Наприклад, дані можуть бути представлені у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1. Оцінка ризику значення кількості небезпек та відповідні оцінки ризику

Місяць	Кількість небезпек (X)	Оцінка ризику (Y)
1	2	3.6
2	5	7.2
3	3	4.8
4	7	8.6
5	4	6.2
6	6	7.8
7	3	4.8
8	8	9.2
9	5	7
10	4	6.2

Для подальшого аналізу необхідно обчислити середні значення для кожної змінної:

$$\bar{X} = \sum X_n, \bar{Y} = \sum Y_n,$$

де n — кількість спостережень.

Для кожного спостереження розраховуються відхилення від середніх значень:

$$(X - \bar{X}), (Y - \bar{Y}).$$

Для визначення кореляційної залежності обчислюються добутки відхилень та їх сума:

$$\sum((X - \bar{X})(Y - \bar{Y})).$$

Для знаменника формули коефіцієнта кореляції Пірсона розраховуються суми квадратів відхилень:

$$\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2$$

Коефіцієнт кореляції Пірсона обчислюється за формулою:



$$r = \frac{\sum((X - \bar{X})(Y - \bar{Y}))}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}}$$

Таблиця 2. Зведені результати розрахунків

$(X - \bar{X})$	$(Y - \bar{Y})$	$(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})$	$(X - \bar{X})^2$	$(Y - \bar{Y})^2$
-2.7	-2.94	7.938	7.29	8.6436
0.3	0.66	0.198	0.09	0.4356
-1.7	-1.74	2.958	2.89	3.0276
2.3	2.06	4.738	5.29	4.2436
-0.7	-0.34	0.238	0.49	0.1156
1.3	1.26	1.638	1.69	1.5876
-1.7	-1.74	2.958	2.89	3.0276
3.3	2.66	8.778	10.89	7.0756
0.3	0.46	0.138	0.09	0.2116
-0.7	-0.34	0.238	0.49	0.1156

$$\begin{aligned} \sum((X - \bar{X})(Y - \bar{Y})) &= 29.82 \quad \sum(X - \bar{X})^2 = 32.1 \quad \sum(Y - \bar{Y})^2 = 28.484 \\ r &= \frac{\sum((X - \bar{X})(Y - \bar{Y}))}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}} = \frac{29.82}{\sqrt{32.1 \times 28.5}} = 0.986 \end{aligned}$$

На основі отриманого значення r робиться висновок про силу та напрямок зв'язку:

- $|r| > 0.7$ — сильний зв'язок,
- $0.3 < |r| < 0.70$ — помірний зв'язок,
- $|r| < 0.3$ — слабкий зв'язок.

У нашому прикладі $r = 0.986$, що свідчить про дуже сильний позитивний зв'язок між кількістю небезпек та оцінкою ризику.

Для прогнозування оцінки ризику на основі кількості небезпек можна побудувати лінійну регресійну модель:

$$Y = aX + b,$$

- де: $a = r \frac{S_Y}{S_X}$ — коефіцієнт нахилу,
- $b = \bar{Y} - a\bar{X}$ — вільний член.

Наприклад, для наведених даних модель має вигляд:

$$Y = 0.92X - 1.2$$

На основі отриманої моделі можна класифікувати рівні ризику:



- Низький ризик: $Y < \bar{Y} - \sigma Y$,
- Середній ризик: $\bar{Y} - \sigma Y \leq Y \leq \bar{Y} + \sigma Y$
- Високий ризик: $Y > \bar{Y} + \sigma Y$

де σY — стандартне відхилення залежної змінної.

Результати дослідження підтверджують ефективність використання коефіцієнта кореляції Пірсона для аналізу ризиків, що може бути корисним у практичній діяльності з управління ризиками. Запропонована методика оцінки ризиків на основі коефіцієнта кореляції Пірсона є ідеальним рішенням для невеликих підприємств. Цей підхід є доступним, економічно вигідним і легко адаптується до різних умов діяльності, що робить його незамінним інструментом для малого бізнесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Перегуда, О.В., Капустян, О.А., & Курилко, О. Б. (2022). Статистична обробка даних: навч. посіб. *Електронне видання*. Відновлено з https://www.mechmat.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/02/navch_pos_perehuda.pdf



Климчук А.О.¹, Кудін О.В.²

¹викладач кафедри програмної інженерії, доктор філософії, Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна, e-mail: yarosh.anastasiya@gmail.com

²професор кафедри програмної інженерії, к.ф.-м.н., доцент, Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна, e-mail: avk256@gmail.com

РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРЯМИХ ТА ОБЕРНЕНИХ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ АДАПТИВНИМИ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМИ МЕТОДАМИ

Розглянуто деякі підходи до побудови адаптивних нейромережових методів розв'язання крайових задач. Акцент зроблено на методи вибору точок колокації та адаптивні функції активації як засоби покращення збіжності нейронних мереж з фізичною інформацією. Для проведення обчислювальних експериментів із розглянутими підходами запропоновано модельні задачі нелінійного згину кругової пластини у геометрично нелінійній постановці..

Ключові слова: фізично-інформовані нейронні мережі; крайові задачі; адаптивні методи.

Крайові задачі є фундаментальними у математичному моделюванні фізичних, інженерних та біологічних процесів. Вони широко використовуються в механіці суцільних середовищ, теплофізиці, гідродинаміці, електродинаміці та інших галузях науки і техніки. Традиційні методи розв'язання таких задач, зокрема методи скінченних різниць, Гальоркіна, Рітца, хоча й демонструють високу точність у багатьох випадках, мають деякі обмеження [1]. Серед основних недоліків класичних чисельних методів слід виділити високу обчислювальну складність, чутливість до методу дискретизації області, необхідність обирати пробні функції тощо.

У зв'язку з цими викликами, сучасні підходи, що ґрунтуються на методах машинного навчання, зокрема фізично-інформованих нейронних мереж (Physics-Informed Neural Networks, PINN), набувають все більшої актуальності [2]. PINN є новим класом алгоритмів, що інтегрують фізичні рівняння у структуру нейронних мереж. На відміну від класичних чисельних методів, PINN не потребують явної дискретизації області. Додатковою перевагою цих методів є можливість порівняно легкого розв'язання обернених задач та оптимізації параметрів математичних моделей, що є особливо важливим для прикладних задач у медицині, фінансах та матеріалознавстві [3].



Традиційні чисельні методи часто вимагають великого обсягу експериментальних даних або значного обчислювального ресурсу для отримання високоточних результатів. Натомість PINN можуть використовувати для навчання не тільки виміряні дані, але й апріорну фізичну інформацію у вигляді рівнянь із частинними похідними, що значно покращує точність моделювання навіть у випадку відсутності повних наборів даних. Це робить PINN особливо корисними для прогнозування складних систем [3].

Водночас, методи PINN мають певні обмеження. Зокрема, навчання нейронних мереж для розв'язання крайових задач може бути складним через необхідність тонкого налаштування гіперпараметрів, вибору відповідної архітектури мережі та складність оптимізації функціоналу втрат. Крім того, для суттєво нелінійних рівнянь стандартні методи PINN можуть демонструвати низьку збіжність або нестабільність розв'язку. Одним із можливих шляхів подолання цих недоліків є розробка гібридних методів, що поєднують PINN із традиційними числовими підходами, а також використання розширених варіантів, таких як адаптивні PINN або операторні нейромережі [4].

Отже, розробка нових методів розв'язання крайових задач, зокрема на основі фізично-інформованих нейронних мереж, є важливим напрямом сучасних досліджень у прикладній математиці, інженерії та науках про дані. Подальший розвиток цих методів може сприяти створенню більш ефективних підходів до розв'язання складних фізичних задач.

Фізично-інформовані нейронні мережі (PINN) використовують точки колокації для апроксимації розв'язку рівнянь із частинними похідними. Правильний вибір цих точок є критичним для точності, збіжності та ефективності навчання моделі. Від того, як саме розподілені точки колокації, залежить здатність PINN відтворювати особливості розв'язку, зокрема градієнти, сингулярності або жорсткі обмеження в певній області визначення.

Одним із найпростіших підходів є рівномірний розподіл точок у межах області розв'язку. Такий підхід добре працює для рівнянь із гладкими розв'язками, але може бути неефективним для задач із локалізованими особливостями або областями зі швидкими змінами функції. У таких випадках рівномірний розподіл точок призводить до поганої апроксимації та уповільнює збіжність нейронної мережі [5].

Одним із вдосконалених підходів є використання адаптивного вибору точок колокації, що ґрунтується на помилках моделі. Наприклад, метод адаптивного вибору точок передбачає збільшення щільності точок у тих регіонах, де модель демонструє найбільшу похибку. Це особливо корисно для задач із граничними шарами, ударними



хвилями або нелінійними ефектами, де точний розв'язок зосереджений у певних областях [5].

Отже, вибір методу визначення точок колокації суттєво впливає на ефективність і точність PINN. Використання адаптивних методів вибірки дозволяє значно покращити збіжність моделі та розширити її застосування до складних фізичних задач із жорсткими граничними умовами або областями з сильними градієнтами.

Також, для покращення збіжності нейромереж з фізичною інформацією часто використовуються адаптивні функції активації. Це метод зміни параметрів функції активації в процесі навчання. Це використовується з метою покращити збіжність і стабільність нейронної мережі. Основна ідея полягає в тому, що коефіцієнт, який масштабує аргумент активації, не є фіксованим, а оптимізується разом із вагами нейромережі під час тренування. Це дозволяє мережі динамічно адаптувати свою структуру для кращого навчання. Отже, кожен шар нейронної мережі або кожен нейрон може мати своє значення коефіцієнта масштабування, яке змінюється в ході оптимізації [6].

Розглянуті адаптивні підходи тестуються на модельній задачі нелінійного згину кругової пластини у геометрично нелінійній постановці. Розглянуто диференціальні рівняння теорій Рейснера та фон Кармана [7].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pinder G.F. (2018). *Numerical Methods for Solving Partial Differential Equations*. John Wiley & Sons, Inc.
2. Karniadakis G.E., & Kevrekidis I.G., & L.Lu, & Perdikaris P., & Wang S., & Yang L. (2021) Physics-informed machine learning. *Nat Rev Phys*, vol. 3, no. 6, pp. 422–440, doi: 10.1038/s42254-021-00314-5
3. Willard J., & Jia X., & Xu S., & Steinbach M., & Kumar V. (2022). Integrating Scientific Knowledge with Machine Learning for Engineering and Environmental Systems. *ACM Comput. Surv.*, <https://doi.org/10.1145/3514228>
4. Sifan Wang & Xinling Yu & Paris Perdikaris. (2022). When and why PINNs fail to train: A neural tangent kernel perspective, *Journal of Computational Physics*, Volume 449, 110768, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110768>.
5. Chenxi Wu & Min Zhu & Qinyang Tan & Yadhu Kartha & Lu Lu. (2023). A comprehensive study of non-adaptive and residual-based adaptive sampling for physics-



informed neural networks. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 403, Part A, 115671, ISSN 0045-7825, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.115671>.

6. Jagtap A.D., & Kawaguchi K., & Karniadakis G.E. (2020) Locally adaptive activation functions with slope recovery term for deep and physics-informed neural networks. *arXiv:1909.12228v4*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.1222>

7. Plaut R.H. (2020). Generalized Reissner analysis of large axisymmetric deflections of thin circular and annular plates. *International Journal of Solids and Structures*, Volume 203, Pages 131-137. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.08.004>.



Olevska Yulia¹, Olevskiy Viktor², Hryshchak Dmytro³

¹*Associate Professor of the Department of Applied Mathematics, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olevska.yu.b@nmu.one*

²*Professor of the Department of Information Technologies and Computer Engineering, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olevskiy.v.i@nmu.one*

³*Doctoral Student of the Department of Information Technologies and Computer Engineering, PhD in Physics and Mathematics, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: hryshchak.d.d@nmu.one*

USE OF AEROSPACE IMAGES FOR CALCULATION OF PURSUIT PROBLEMS BY METHODS OF CORPORATE DIFFERENTIAL GAMES

Abstract. The purpose of the study is to develop a methodology for the use of multichannel satellite images for driving vehicles in mathematical models of pursuit in corporate differential games (CDG). CDG simulate interactions between players in a dynamic environment described by differential equations. Based on CDG and machine learning of neural networks, the information technology for optimal control of vehicles has been created.

Keywords: multichannel space images, corporate differential games, neural network, geographic information systems.

Introduction. The war in Ukraine has led to significant changes in the geopolitical landscape, stimulating the development of new technologies, including unmanned aerial vehicles, drones, and modern weapons systems. The study of mathematical models of pursuit in combination with methods of corporate differential games can help in the development of the latest vehicle control systems (VCS) in the civilian and military spheres. The purpose of the study is to develop a methodology for using multichannel satellite imagery data in vehicle control systems based on pursuit models in corporate differential games [1].

Material and results of research. Multichannel Aerospace Imaging (MAI) is data obtained from drones or satellites that capture electromagnetic radiation in different spectral ranges. The use of many channels greatly improves the possibilities for classification, detection of changes and monitoring. MAIs require complex processing for integration with aircraft control systems [2]. This requires the development of new methods and algorithms to process, analyze and visualize this data.



Differential game theory is a branch of game theory that studies mathematical models of interaction between players in a dynamic environment described by differential equations [1]. In corporate differential games, the pursuit task simulates the process of interaction between several players who seek to achieve their goals in a dynamic environment. It is based on a mathematical formulation that takes into account the target functions, limitations and dynamics of the players' state. In military conditions, these players can be the following: own forces (aircraft control, resource optimization, task execution), enemy (location, actions, anticipation of strategies), environment (geography, weather conditions, infrastructure). The main tasks that are solved by solving corporate differential games in these conditions are as follows: determining the optimal route of the aircraft, taking into account the risks, maximizing the performance of the combat mission while minimizing losses, and responding to changes in the dynamic environment.

In the game of N players, each i -th player has his own state, which is described by a time-

dependent vector variable $x_i(t)$. Players' strategies are set by their control $u_i(t)$. The state of the system is described by the vector of states of all players $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]$. The system evolves according to the system of differential equations with respect to time t of the form

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)), i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

where f_i are functions that take into account the interaction between players.

Every player strives to maximize or minimize their target feature

$$J_i = \int_0^T g_i(x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)) dt, \quad (2)$$

where g_i describes the gain or loss of i -th player.

The real limitations of the system, such as the location of the impact zones, the availability of resources or the technological limits of an unmanned aerial vehicle, can be expressed by equations or inequalities of the species

$$h_j(x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)) \leq 0, j = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

Since the restrictions are dynamic and link the states of all players, they allow you to take into account new information about the movement of opponents. This is the main thing in building the solution of the variational problem of finding the optimal control and trajectory of the aircraft. It should be noted that the found price of the game reflects the guaranteed win (or loss) of the player regardless of the actions of opponents. Therefore, the solutions of the game



can be used to build a neural network to find the necessary values of the parameters and the initial state of the aircraft, which would guarantee the completion of the task.

The solution of the corporate game is not achieved at the saddle point, but in the conditions of achieving equilibrium, for example, Nash [3]. The Nash equilibrium defines such a state in which no player can improve his position J_i by changing his strategy if the strategies of others remain unchanged. The optimization problem can be written as follows: maximize J_i (2) for all i , subject to conditions (1) and (3).

We have developed a system of machine and deep learning of a neural network [4], which can also be used to analyze aerospace images. The initial level is the Convolutional Neural Network (VGGNet), which identifies suspicious areas of danger in images. The main goal of this first layer is to build a deep architecture with numerous convolutional layers to efficiently extract functions from images. This provides high recognition accuracy due to the specialization of the network for a specific type of image, thereby reducing the number of false positives. A deep learning model to obtain an optimal VCS is trained using a database. The second level is designed to create an optimal VCS. It performs a classification of problematic objects detected on the first layer and generates recommendations for further investigations and action protocols. In deep learning, the second layer uses object data from the first layer along with metadata from the database.

Existing VCSs face significant problems in recognizing suspicious objects based on monochromatic data. Our neural network architecture for optimal VCS solves this by combining multiple images at the first level to improve object detection accuracy. These images are scaled to a uniform size that corresponds to their physical location on the surface, and a statistical matching criterion is applied to the object's outline points with a given confidence level.

Conclusions. Based on the CDG, information technology for optimal control of vehicles was created, taking into account the data of aerospace images. We have developed the system of machine and deep learning of a neural network, which is used to analyze aerospace images. This optimal management model can conduct in-depth analysis of large data sets and discover new information that it may not have been specifically trained to find.



REFERENCES

1. Alias, I., Jaman, K., & Ibragimov, G. (2022). Pursuit differential game of many pursuers and one evader in a convex hyperspace. *Mathematical Modeling and Computing*, (9), 9–17.
2. Shevchenko, V., Hnatushenko, V., & Kavats, O. (2015). Pansharpening technology of high-resolution multispectral and panchromatic satellite images. *Naukovyi Visnyk NGU*, (4), 91–98.
3. Carmona, G. (2012). *Existence and stability of Nash equilibrium*. World Scientific Publishing Company.
4. Aziukovskyi, O. et al. (2024). Architecture of a computer decision support system for CADx breast cancer. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making, Volume 1. ISDMCI 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 219. Springer, Cham.



Романишин Ростислав

доцент кафедри радіофізики та комп'ютерних технологій, кандидат технічних наук, факультет електроніки та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка, Львів, Україна, rostyk.romanyshyn@gmail.com.

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ДІАГНОСТИКИ ПОШКОДЖЕНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Анотація. Робота присвячена актуальній тематиці – застосуванню технологій штучного інтелекту в задачах ультразвукової діагностики матеріалів і конструкцій на основі реєстрації ультразвукового зворотно розсіяного сигналу і побудови зображень просторового розподілу перерізу зворотнього розсіювання в об'ємі матеріалу.

Ключові слова: штучний інтелект, машинне навчання, ультразвуковий контроль, розсіяна пошкодженість матеріалу.

Аналіз стану проблеми. На ринку неруйнівного контролю є ряд приладів та технологій, котрі дозволяють проводити моніторинг стану об'єктів для виявлення дефектів. Однак такі засоби „жорстко зв'язані” з визначеними умовами експлуатації та обробкою результатів контролю. Приймання рішень здійснюється оператором. Зміна умов експлуатації або вимог до діагностики об'єкту зв'язана з громіздкою переробкою діагностичних технологій.

Як правило, проводиться автономний контроль об'єктів та інтерпретація результатів оператором вручну окремими методами (акустичні, електромагнітні тощо). Хоча складні технічні об'єкти (напр., літальні апарати, судна, об'єкти атомної енергетики та ін.) вже давно потребують автоматизованого неперервного сумісного багатопараметрового моніторингу різними методами [1-5].

Використовувані в існуючих приладах підходи, як правило, не дають можливості передбачити утворення дефектів та оцінити ресурс безаварійної працездатності виробів.

Процедури діагностики (дефектоскопії) і прогнозу ресурсу безаварійної працездатності виробів розділені. Для прогнозу ресурсу безаварійної працездатності експериментальні діагностичні дані вводяться вручну або використовуються усереднені, отримані раніше. Це унеможлиблює автоматизацію, підвищує суб'єктивність і знижує достовірність діагностики/прогнозу [6].

В той же час сучасний розвиток комп'ютерної техніки, алгоритмічно-програмних засобів на основі застосування технологій штучного інтелекту, нейронних мереж,



хмарних технологій тощо дозволяє на новий рівень підняти можливості діагностичних систем шляхом розробки їх як інтелектуальних інформаційних систем. Слід відмітити, що в даний час спостерігається значний розрив між можливостями технологій штучного інтелекту та застосуванням їх для розробки діагностичних систем [7-9].

Робота присвячена актуальній тематиці – застосуванню технологій штучного інтелекту та машинного навчання в задачах ультразвукової діагностики матеріалів і конструкцій на основі формування ультразвукових зображень просторового розподілу неоднорідностей матеріалу [10,11].

Очікувані результати. Побудова діагностичної інтелектуальної інформаційної системи буде здійснюватися у відповідності з принципами Інтернету речей [5]. Побудова системи буде націлена на забезпечення якнайширшої автоматизації, самоконтролю, самодіагностування та прийняття рішень в процесі безперервного комплексного віддаленого моніторингу об'єкту різними методами.

Архітектура інтелектуальної інформаційної системи буде передбачати побудову віртуальної моделюючої системи, яка би забезпечувала моделювання роботи реальної системи, що дозволить відпрацьовувати інтелектуальні інформаційні технології реєстрації і бізнес-процесу при зміні умов експлуатації реальної системи/підсистеми.

Інтелектуальна інформаційна діагностична система буде містити базу знань, складовою частиною якої є база даних. База даних буде містити незмінні облікові дані. База знань буде динамічною, в ній будуть міститися актуальні траєкторії деградації [6], а також дані про миттєвий стан/ресурс безаварійної працездатності для кожної підсистеми і для системи в цілому.

Інтелектуальна інформаційна система буде базуватися на вкладених онтологіях для кожної підсистеми і системи взагалі, що спростить побудову і дозволить легко модифікувати інтелектуальну інформаційну діагностичну систему при зміні умов експлуатації і вимог.

Використання хмарних технологій забезпечать віддалений моніторинг, доступ до IT-інфраструктури за допомогою Інтернету з будь-якого комп'ютерного пристрою та дозволять зберігати прикладне програмне забезпечення та обробляти дані.

Будуть використовуватись інформаційні технології штучного інтелекту, нейронні мережі, машинне (Machine Learning) і глибоке навчання (Deep Learning) для синтезу і виявлення типових фрагментів даних при попередній обробці, знаходженні дефектів, оцінці їх розмірів, властивостей, валідації, інтерпретації результатів контролю, прийнятті рішень.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Vrana J., Singh R. NDE 4.0 – A Design Thinking Perspective // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2021, 40, 8. – 24 p. DOI 10.1007/s10921-020-00735-9.
2. Vrana J. NDE 4.0: The Fourth Revolution in Non-Destructive Evaluation: Digital Twin, Semantics, Interfaces, Networking, Feedback, New Markets and Integration into the Industrial Internet of Things. – 20p.
3. Coelho P., Bessa C., Landeck J., Silva C. Industry 5.0: The Arising of a Concept // Procedia Computer Science (4th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing). – 217 (2023). – P.1137–1144.
4. Barata J., Kayser I. Industry 5.0 – Past, Present, and Near Future // Procedia Computer Science (CENTERIS – International Conference on ENTERprise Information Systems / ProjMAN – International Conference on Project MANagement / HCist – International Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies 2022). – 219 (2023). – P. 778–788.
5. <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/industry-50> **Industry 5.0.**
6. Peysson F., Ouladsine M., Outbib R., Leger J., Myx O., Allemand C. Damage Trajectory Analysis based Prognostic / Int. Conf. on Prognostics and Health Management. – 2008. – 8h.
7. Cantero-Chinchilla S., Wilcox P., Croxford A. Deep learning in automated ultrasonic NDE – developments, axioms and opportunities / arXiv:2112.06650v2. 15 Jul 2022. – 28p.
8. Pyle R. Application of machine learning to ultrasonic nondestructive evaluation / A dissertation submitted to the University of Bristol in accordance with the requirements for award of the degree of Engineering Doctorate in the Faculty of Engineering. – 2023. – 95p.
9. Kleinert W. Defect Sizing Using Non-destructive Ultrasonic Testing. Applying Bandwidth-Dependent DAC and DGS Curves. – Springer, 2016. – 126p. DOI 10.1007/978-3-319-32836-2.
10. Romanishin R.I., Romanishin I.M. Assessment of Scattered Damage in Structural Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. - 2019, **55**, No. 2. – P.111-121.
11. Романишин Р.І. Розвиток ультразвукового методу діагностування пошкодженості металу на основі реєстрації зворотньо-розсіяного сигналу. – Автореферат на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спец. 05.02.10 – діагностика матеріалів та конструкцій. – Львів, ФМІ НАНУ, 2017. – 22 с.



Романишин Ростислав¹, Романишин Галина²

¹доцент кафедри радіофізики та комп'ютерних технологій, кандидат технічних наук, факультет електроніки та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка, Львів, Україна, i.m.romanyshyn1@gmail.com.

²магістр, Львів, Україна, halyna.romanyshyn@gmail.com.

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ РЕЄСТРАЦІЇ ЗВОРОТНО РОЗСІЯНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛУ

Анотація. В роботі описана інформаційна система ультразвукової діагностики конструкційних матеріалів на основі реєстрації зворотно розсіяного сигналу і оцінювання розсіяної пошкодженості та переддефектного стану матеріалу в об'ємі виробу.

Ключові слова: інформаційна система, ультразвукова діагностика, зворотно розсіяний сигнал, статистична обробка, база даних.

Вступ. Важливою задачею технічної діагностики є оцінювання стану металу ультразвуковими методами. Не дивлячись на те, що ультразвукові методи знайшли широке застосування в неруйнівному контролі [1] і медицині, для оцінювання переддефектного стану металу [2], розсіяної пошкодженості [3] застосовуються обмежено і переважно в лабораторних умовах [4-6]. Для рішення цих задач адекватним є застосування зворотно розсіяного сигналу [7-9]. Зворотно розсіяний сигнал є шумоподібним. В неруйнівному контролі він практично не застосовувався і вважався завадою («структурним шумом» [4]). Відомі окремі роботи, які стосувались застосування зворотно розсіяного сигналу для дослідження структурних характеристик матеріалу [5, 6, 10]. Для розвитку цих методів необхідним є забезпечення можливості документування параметрів об'єкту контролю, стану металу, умов і результатів експериментальних досліджень. Забезпечення цієї можливості здійснюється шляхом розробки інформаційної системи ультразвукової діагностики матеріалів на основі реєстрації зворотно розсіяного сигналу [9].

Інформаційна система – це взаємозв'язана сукупність математичних, технічних, програмних, інформаційних та інших засобів, призначена для збору, обробки, зберігання і видачі інформації, а також для прийняття рішень. В основі інформаційної системи лежить база даних, яка формується, виходячи з аналізу предметної області.



Системний аналіз предметної області.

Використання зворотно розсіяних сигналів накладає ряд вимог до побудови інформаційної системи і формування бази даних. Відмітимо наступні особливості ультразвукової діагностики на основі реєстрації зворотно розсіяних сигналів.

1. Проводиться сканування поверхні об'єкту контролю прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем, ультразвукове імпульсне зондування та багатократна реєстрація сигналу у вигляді А-скану [11] (рис. 1).

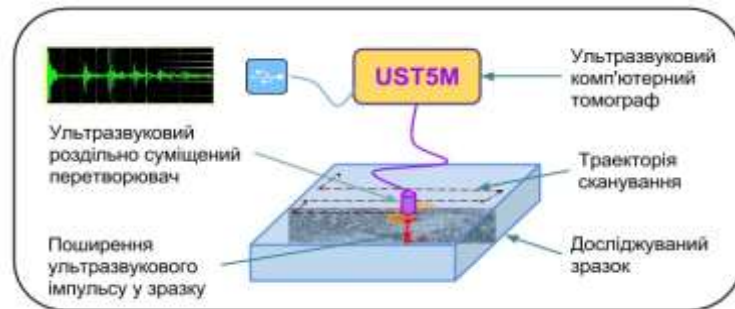


Рисунок 1 – Ультразвукова технологія діагностики пошкодженості об'єктів на основі реєстрації зворотно розсіяного сигналу – схема збору даних

2. Часова реалізація зареєстрованого сигналу (рис. 2) містить кілька ділянок: зондуючий імпульс, ревербераційний сигнал призми, сигнал, який відбитий від границі призма-метал, «інформативний сигнал», перший відбитий донний сигнал і т.д.

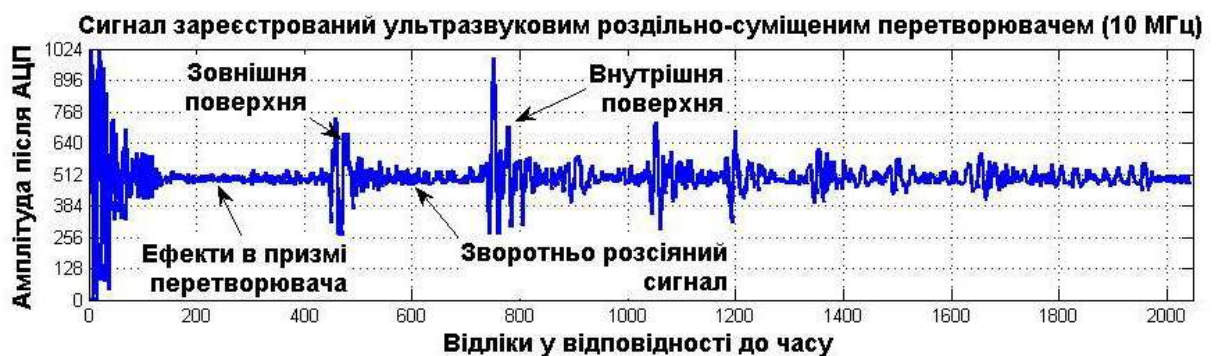


Рисунок 2 – Типова RF-реалізація А-скану

3. Інформативним сигналом є частина А-скану від кінця імпульсу, відбитого від границі призма-метал до початку першого відбитого донного сигналу. Припускається, що ця частина А-скану є зворотно розсіяним сигналом від відповідних ділянок неоднорідностей зондованого об'єкту і несе інформацію про параметри стану металу, зокрема, про розсіяну пошкодженість [3].



4. Зворотно розсіяний ультразвуковий сигнал є шумоподібним сигналом і для його обробки застосовують статистичні методи [4]. Параметри статистичної обробки залежать від характеристик п'єзоперетворювача (частота, тривалість зондуючого імпульсу), приймальної системи (частота дискретизації), об'єкту контролю, вимог діагностики. Результати статистичної обробки багатократно зареєстрованих часових реалізацій зворотно розсіяного сигналу є інформативними параметрами про розсіяну пошкодженість в об'ємі матеріалу.

Структура бази даних.

На рис. 3 подана ER діаграма бази даних, згенерована VISUAL STUDIO.

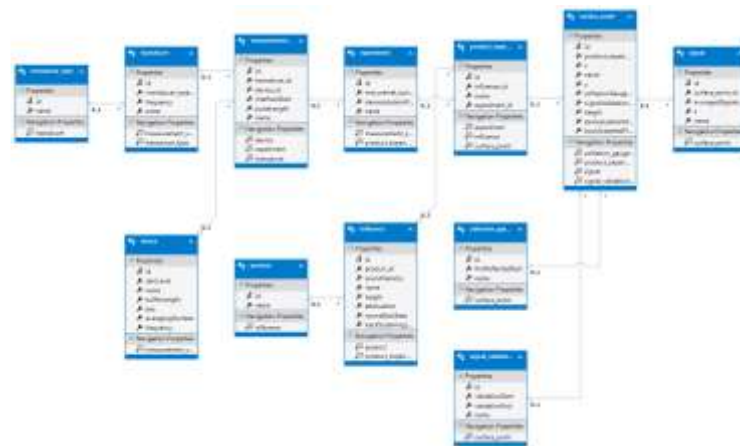


Рисунок 3 – ER-діаграма бази даних інформаційної системи ультразвукової діагностики на основі реєстрації зворотно розсіяного сигналу

Тут можна виділити три частини бази даних: вимірювальні засоби; об'єкт контролю; результати діагностики. Ця інформація заноситься у відповідні таблиці для подальшого аналізу, діагностики і матеріалознавчих досліджень.

Висновки. Розроблена інформаційна система ультразвукової діагностики та матеріалознавчих досліджень, які націлені на визначення розсіяної пошкодженості матеріалів на основі реєстрації зворотно розсіяного ультразвукового сигналу. Інформаційна система дозволяє документувати параметри ультразвукових засобів діагностики, апіорні дані про об'єкт досліджень та результати діагностики. База даних інтегрована в діагностичне програмне забезпечення ультразвукового комп'ютерного томографа на зворотно розсіяному сигналі. Програмне забезпечення реалізоване на мові C# з використанням технології ORM для роботи з базами даних MySQL та парадигми об'єктно-орієнтованого програмування для подальшого гнучкого вдосконалення.

Інформаційна система може використовуватися в матеріалознавчих дослідженнях та для моніторингу переддефектного стану конструкційних матеріалів в процесі експлуатації і завчасного виявлення місць, ймовірних щодо виникнення дефектів



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ(ВІДПОВІДНО ДО АРА)

1. Крауткремер І. Ультразвуковий контроль матеріалів: Довід. вид. / Й.Крауткремер, Г.Крауткремер / Пер. з нім. - М.: Металургія, 1991. - 752с.
2. Родюшкін В. М. Від пошуку дефектів до пошуку переддефектного стану // Вісник науково-технічного розвитку / В. М.Родюшкін. - 2009. - №4. - С.51-56.
3. Степанова Л.В., Ігонін С.О. Опис розсіяного руйнування: параметр ушкодженості Ю.М.Работнова: історична довідка, фундаментальні результати та сучасний стан // Вісник СамДУ - Природничо-наукова серія. - 2014, № 3 (114). - С.97-114.
4. Miralles R. Material grain noise analysis by using higher-order Statistics / R.Miralles, L.Vergara, J.Gosalbez // Signal Processing. – 2004. – P. 197-205.
5. Ville E Kananen. Discriminating pores from inclusions in rolled steel by ultrasonic echo analysis / Ville E Kananen, Joona J Eskelinen, Edward O Hæggstrom // Meas. Sci. Technol. – 2011, 22. – P. 105704 (7 p.).
6. Бусов В.Л. Розсіювання ультразвукових хвиль на мікротріщинах у фрагментованих полікристалах // Акустичний вісник. - 2007, т. 10, № 3. - С. 19-24.
7. Birring A.S., Bartlett M. L., Kawano K. Ultrasonic Detection of Hydrogen Attack in Steels // Corrosion (National Association of Corrosion Engineers). – 1989 , v. 45, № 3.
8. Иофин И.Д., Бусов В.Л., Шишкин И.В. Об установке усталостных испытаний стальных образцов с применением неразрушающего акустического метода контроля // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2008, № 3Е (14). – С. 61-65.
9. Романишин Р.І. Розвиток ультразвукового методу діагностування пошкодженості металу на основі реєстрації зворотньо-розсіяного сигналу. – Автореферат на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спец. 05.02.10 – діагностика матеріалів та конструкцій. – Львів, ФМІ НАНУ, 2017. – 22 с.
10. Thompson R., Margetan F.J. Use of elastodynamic theories in the stochastic description of the effects of microstructure on ultrasonic flaw and noise signals // Wave Motion. – 2002, 36. – P. 347-365.
11. Неруйнівний контроль. У 5 кн. Кн.2. Акустичні методи контролю: практ. посібник / Єрмолов І.М., Альошин М.П., Потапов О.І.; під ред. Сухорукова В.В. - М.: Вища школа, 1991. - 283с.



Вереньов Валентин¹, Коренной Володимир²

¹старший науковий співробітник, доктор технічних наук, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, e-mail: verenev0704@gmail.com

²науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, e-mail: koren_noy@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ПРОКАТНОГО ОБЛАДНАННЯ

Анотація. На досвіді промислових досліджень шести безперервних широкополосних станів гарячої прокатки зазначені приклади нового підходу до визначення технічного стану, перш за все кутових зазорів в лінії приводу валків, по даним вимірювань в період захвату полоси .

Ключові слова: технічний стан, перехідний процес, кутовий зазор, лінія приводу, момент сил пружності, вібрація.

Вступ. Лінія приводу прокатних валків складається з 5-10 зчленувань, елементи яких зношуються, що призводить до розвитку кутових зазорів та збільшенню ударних навантажень. Своєчасне визначення технічного стану зчеплень дозволяє підвищити якість обслуговування обладнання.

Матеріал і результати досліджень. В лініях приводу прокатних валків на перехідні процеси, обумовлені захватом полоси, значно впливають кутові зазори в зчленуваннях механізмів. Максимальне значення моменту сил пружності (M_d) може в 2–5 разів перевищувати момент сил пружності (M_c) в сталому режимі прокатки, помітно змінюється вигляд і період коливань моменту та вібрації, другий пік коливань моменту перевищує перший, після першого піку момент падає до нуля з ударною дією в зворотному напрямку.

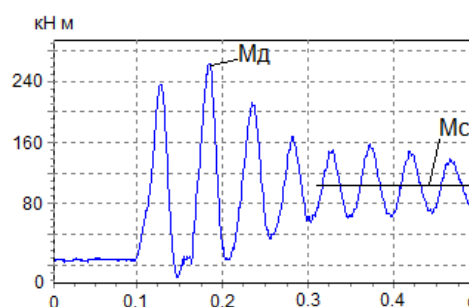


Рисунок 1 – Момент сил пружності (максимальний динамічний – M_d , сталий



статичний – M_c) при перехідному процесі.

На основі значної кількості дослідно-промислових вимірювань в безперервних станах та встановлених закономірностях розроблені та обґрунтовані способи визначення технічного стану обладнання ліній приводу з використанням параметрів перехідних процесів.

1. По часу запізнення реакції ділянок лінії приводу на захват полоси визначають кутові зазори, наприклад, в шпинделях і зубчатому зчепленні редуктора – чим більше час реакції, тим більше зазори [1]. Час запізнення визнається як по моменту сил пружності, так і по вібрації корпусного обладнання, що значно спрощує вирішення задачі.

2. В якості додаткового способу запропоновано визначати швидкість розповсюдження деформаційної хвилі вздовж лінії приводу від валків до двигуна, порівнюючи її з еталонною швидкістю. Зі збільшенням величини кутових зазорів швидкість деформаційної хвилі зменшується.

3. В інших способах використовуються властивості взаємодії двох сусідніх клітей через полосу, яка прокатується: коли захват полоси відбувається в наступній кліті [2], а також під час 4-хиткової прокатки [3].

4. В способі [4] використовується виявлена залежність - чим більша швидкість руху полоси перед прокатними валками, які обертаються з постійною швидкістю, тим на більшу величину розмикаються кутові зазори перш за все у шпиндельному з'єднанні. Це дозволяє визначити найбільші їх значення, що важливо для діагностування.

5. Співпадіння періоду коливань моменту сил пружності, електромагнітного моменту двигуна і вібрації корпусу редуктора дозволяє визначити технічний стан зчеплення редуктора та зубчатих муфт [5].

В інших способах використано зв'язок технічного стану лінії приводу і технології прокатки з коефіцієнтами варіації максимального (M_d) та сталого (M_c) моментів сил пружності і коефіцієнта динамічності (K_d); параметрами кореляційного поля результату прокатки за значний період часу, де кожна прокатана полоса характеризується величиною M_d та M_c , що апроксимується лінійною залежністю виду $M_d(M_c) = K_{пр} \cdot M$ з певним кутом нахилу (γ), який має діагностичні властивості (рис. 2); запропоновані цілеспрямовані види прокатки і режими роботи обладнання в період захвату полоси валками, одночасне вимірювання додаткових параметрів, наприклад, поздовжніх зусиль у фундаментних болтах та вібрації корпусного обладнання в певних місцях.



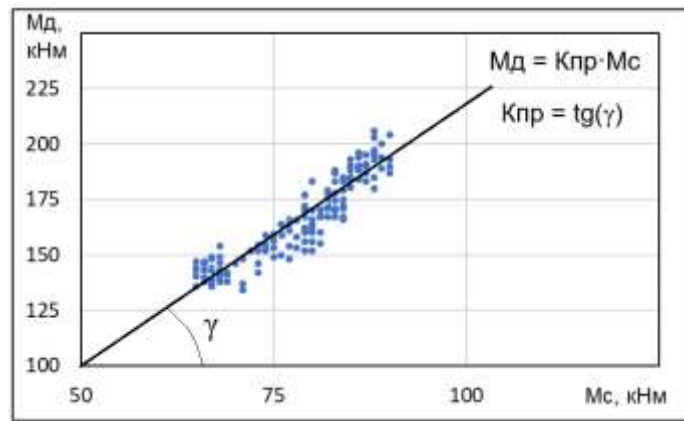


Рисунок 2 – Статистична залежність максимального динамічного моменту сил пружності (Мд) від статичного моменту прокатки (Мс).

Висновки. Досвід промислових досліджень та математичного моделювання перехідних процесів в лініях приводу прокатних клітей свідчить про широкі можливості подальшого розвитку нового напрямку пошуку способів діагностування технічного стану обладнання прокатних станів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вереньов В.В., Юнаков О.М., Далічук А.П., Путнокі О.Ю., Мацко С.В., Борщов О.В. & Будакова С.А. (2004). *Спосіб визначення технічного стану устаткування крутильної системи лінії головного приводу прокатної кліті* (Патент України № 70137).
2. Вереньов В.В., Далічук А.П., Коренной В.В., Путнокі О.Ю., Сімененко О.В., Мацко С.В., Яценко В.О., Шелудченко О.С., Телюк Д.В. & Вишнівецький С.М. (2009) *Спосіб визначення технічного стану ділянок лінії головного приводу першої кліті при безперервній прокатці заготовки у двох суміжних клітях* (Патент України № 87575).
3. Вереньов В.В., Баглай А.В., Кіпін М.М., & Подобєдов М.І. (2021) *Спосіб діагностики лінії головного приводу валків кліті з багатонитковою прокаткою* (Патент України № 124756).
4. Вереньов В.В., Подобєдов М.І., Путнокі О.Ю., Мацко С.В., Телюк Д.В. & Єрмоленко А.О. (2009) *Спосіб визначення зміни технічного стану зчленування робочий валок-шпіндель лінії головного приводу прокатної кліті* (Патент України № 87827).
5. Вереньов В.В., Далічук А.П., Коренной В.В., Мацко С.В., Сімененко О.В., Єрмоленко А.О., Телюк Д.В., Вишнівецький С.М., Войтович О.І. & Путнокі О.Ю. (2009) *Спосіб визначення технічного стану зубчатого зачеплення редуктора лінії приводу прокатної кліті* (Патент України № 86640).



Абраменков Костянтин¹

¹аспірант кафедри Інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії,
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м.Дніпро, Україна, e-mail: Abramenkov.K.M@nmu.one

МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ В УМОВАХ ВИКОРИСТАННЯ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Анотація. Запропоновано методи оптимізації обробки зображень у реальному часі, що поєднують адаптивне вейвлет-перетворення, оптимізоване колірне перетворення, динамічну декореляцію каналів та масштабовану інтерполяцію. Це дозволяє підвищити швидкість обробки на 15–20%, покращити якість зображень та знизити рівень шуму в складних умовах зйомки.

Ключові слова: обробка зображень, БПЛА, вейвлет-перетворення, декореляція каналів, реальний час.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) та мініатюрні сенсорні системи наразі широко застосовуються у моніторингу, картографії, сільському господарстві та безпекових системах. Їх переваги – це низька вартість, висока часово-просторова гнучкість і можливість встановлення камер різних діапазонів (видимого, інфрачервоного, теплового). Водночас постає низка технічних викликів, зокрема:

- Обмежені ресурси для обробки зображень на борту - **обчислювальні можливості, вага, енергоспоживання;**
- Високий рівень шуму й геометричних спотворень через вібрації й нестационарність польоту, змінні типи оптичних сенсорів (видимий, інфрачервоний, тепловий діапазони), змінна кількість сенсорів (каналів даних) змінна висота зйомки;
- Необхідність реальної (або майже реальної) часової обробки, щоб приймати оперативні рішення (навігація, виявлення об'єктів тощо).

Для вирішення цих завдань пропонуються методи покращення зображень, що комбінують вейвлет-перетворення, декореляцію каналів, колірні перетворення (HSV/гіперсферичне), а також збільшення роздільності (інтерполяція) й паншарперінг. Однак у чинних підходах (розроблених переважно з урахуванням супутникових даних) завжди є запит на належну оптимізацію для обробки потокових зображень із дронів, які



мають нестабільні умови зйомки та вельми різні сенсори з різними технічними характеристиками.

Метою дослідження є пошук методів прискорення швидкості обробки за рахунок комбінації діючих технологій, які вже показали свою результативність та підтверджені результатами попередніх досліджень.

Наявні практики. Послідовне застосування вейвлет-декомпозиції з фільтрацією (часто на високому рівні декомпозиції), що збільшує час обробки, перетворення HSV або НСТ без достатнього урахування динаміки польоту, що спричиняє нестабільне відтворення кольорів, Використання фіксованих матриць декореляції (наприклад, PCA) для зняття надлишковості каналів, але без адаптації до змінних умов зйомки.

Запропоновані зміни.

Адаптивне вейвлет-перетворення у пакетному режимі з обмеженням рівнів декомпозиції залежно від швидкості руху й параметрів сцени, а також за рахунок пропуску сцен задля зменшення навантаження. Це скорочує час обробки на 20–25% порівняно з класичним підходом, водночас забезпечуючи до 15% ефективніше шумозаглушення в режимі реального часу.

Оптимізація колірного перетворення (HSV/ НСТ).

Використання LUT (Look-Up Table) для пришвидшення прямих і обернених операцій у колірному просторі;

Автоматичне підлаштування яскравості (Value/Intensity) до панхроматичного або ГЧ-каналу з урахуванням середньої розподільної здатності. Це дає до 10–12% швидшої обробки та краще збереження кольорів на рівні 85–90% відносного показника спектральної подібності, тоді як у базовій методиці цей показник коливається в діапазоні 70–75%.

Динамічна декореляція каналів (PCA).

Запровадження механізму оновлення власних векторів під час зміни сцени (висота польоту, зміна ракурсу). Така адаптація зменшує похибку відтворення дрібних деталей на 10–15% та усереднює різницю яскравостей каналів у межах 5–7%, замість 12–15% у старому методі. Ефективність методу потребує додаткових досліджень.

Швидка бікубічна інтерполяція та паншарперінг із динамічним вибором масштабу.

За низької висоти (ближче до 500 м) виконується менший коефіцієнт збільшення, за великої (до 2000 м) – більший. Це знижує артефакти і дає загальне підвищення



візуальної чіткості на 25–30% (за суб'єктивною оцінкою та метрикою SSIM) порівняно з класичною статичною схемою.

Загалом, у порівнянні з діючою методикою (що зорієнтована здебільшого на супутникові зображення та не враховує повною мірою умови реального часу), вдалося підвищити продуктивність у середньому на 15–20%, знизити шум і зберегти спектральну достовірність на 10–15% кращому рівні відповідно до тестів на кількох наборах даних, зібраних із дронів різного типу.

Висновки. Запропонований підхід адаптує існуючі технології (вейвлет-перетворення, колірні перетворення, паншарперінг, декореляцію каналів) під потреби обробки зображень у реальному часі з дронів на висоті зйомки 500–2000 м. За рахунок адаптивного керування глибиною вейвлет-декомпозиції, використання LUT для швидкого колірного відображення, динамічної декореляції та масштабованої бікубічної інтерполяції вдалося прискорити загальну обробку, зменшити рівень шуму та підвищити точність відтворення дрібних деталей. На практиці це означає, що оператор або автоматизована система отримують більш якісне зображення швидше, що є критичним для моніторингу, пошуково-рятувальних робіт, точного землеробства, а також для військового й промислового застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гнатушенко В.В., Каштан В.Ю. (2017) Технологія геометричної та спектральної корекції оптико-електронних космічних знімків, Вісник ХНТУ (3)(62).
2. Mallat S. A (2008). Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press.
3. Gonzalez R., Woods R. (2018). Digital Image Processing. Pearson.
4. Vivone, G., Restaino, R., Garzelli, A., Scarpa, G., & Ghasemi, P. (2015). A critical comparison among pansharpening algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(5), 2565–2586. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2361734>
5. Li, S., Kang, X., Fang, L., Hu, J., & Yin, H. (2017). Pixel-level image fusion: A survey of the state of the art. *Information Fusion*, 33, 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.05.004>
6. Zhang, Y. (2004). Understanding image fusion. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(6), 657–661.



В.С. Дорошенко

пров. наук. співр., д. т. н., с. н. с., Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна, e-mail: doro55v@gmail.com

ПРО ІНІЦІАТИВУ «BACK BRITISH METALS INITIATIVE», АНАЛОГ ЯКОЇ БУВ БИ КОРИСНИМ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ МЕТАЛУРГІЇ ТА МЕТАЛООБРОБКИ В УКРАЇНІ

Анотація. Ініціатива «Back British Metals Initiative» спрямована на підтримку металургії та металообробки у Великобританії. Її аналог в Україні міг би стати ключовим кроком для відновлення промисловості, забезпечуючи інновації, екологічну стійкість, конкурентоспроможність на світовому ринку та посилюючи обороноздатність країни.

Ключові слова: метал, металургія, металообробка, промисловість, Великобританія, Україна

Вступ. Ініціативу «Back British Metals» (BBM, <https://backbritishmetals.org>) створено у Великобританії як відповідь на виклики, що постали перед національною металургійною та металообробною промисловістю. Її основною метою є підтримка вітчизняного виробництва, пов'язаного з металами, стимулювання розвитку ланцюгів постачання та збереження робочих місць у секторі разом з підвищенням конкурентоспроможності металургійних підприємств, захистом їхніх інтересів перед регуляторними органами та просуванням продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках. Запровадження в Україні аналогічної ініціативи може стати рушієм для відновлення металургійної та металообробної галузей з підвищенням їх стійкості до зовнішніх викликів і зміцненням обороноздатності країни.

Матеріал і результати огляду. BBM спрямована на зміцнення металургійного сектору Великобританії як важливої основи майбутнього процвітання, інновацій та глобальної конкурентоспроможності країни. Глобальна економіка переходить від світу з інтенсивним використанням викопного палива до світу з інтенсивним використанням матеріалів, а метали лежать в основі всіх великих галузей, що розвиваються – від аерокосмічної, оборонної та автомобільної до відновлюваної енергетики, цифрової інфраструктури та передового виробництва. Якщо інші країни визнають це та збільшують інвестиції в свою металургійну промисловість, то політика Великобританії досі не вважала метали як пріоритет, а донедавна не визнавала цей сектор зростання в



останньому проєкті промислової стратегії уряду. Ініціатори BVM виступають за єдине стратегічне бачення металів, від створення вартості на первинному виробництві, обробці та литті до переробки та повторного використання. Представляючи величезну мережу малих і середніх підприємств, які утворюють основу промислової бази країни, ініціатори гарантують, що їхній голос почують на найвищих рівнях прийняття політичних та інвестиційних рішень. Місія BVM полягає в тому, щоб позиціонувати металургію як сучасну високовартісну галузь, що розвивається, необхідну для безпеки, розвитку та економічного майбутнього країни. Ініціатива показує, як цей сектор стимулює інвестиції, створює високопродуктивні робочі місця та впроваджує передову технологію. BVM спрямована у майбутнє та орієнтована на можливості, не просто захищаючи те, що існує, а демонструє, де є потенціал для зростання, будь то сучасні сплави, виробництво наступного покоління чи забезпечення ролі країни в глобальному ринку. Ініціатори стратегічного обґрунтовують те, що країна має застосовувати свої переваги в інноваціях, фінансах та промислових регіонах світового рівня, щоб перетворити метали в основу майбутнього економічного успіху. BVM створено, щоб гарантувати, що металургійна промисловість Великобританії не залишиться без уваги, а визнається, інвестується та позиціонується як ключовий рушій національного та глобального прогресу.

Чому Україні потрібна аналогічна ініціатива? Металургія є основою української промисловості, а ливарне виробництво відіграє ключову роль у забезпеченні машинобудування, оборонного комплексу, транспортної інфраструктури. Однак, унаслідок війни, втрати виробничих потужностей та в умовах глобальної ринкової конкуренції Україна потребує нових стратегічних підходів для відновлення та розвитку металургійного сектору.

Аналізуючи досвід BVM, можна виділити кілька напрямків, які доречні при створенні аналогічної ініціативи в Україні, яка є одним із лідерів у виробництві металів, що має потужну сировинну базу та досвід у металургії. Запровадження політики пріоритетного використання українських металів у державних закупівлях та інфраструктурних проєктах сприятиме зміцненню внутрішнього ринку. Підтримка малого та середнього бізнесу у сфері металообробки стимулює наукоємні та інноваційні технології, адитивне виробництво (3Dдрук) та створення нових виробничих потужностей. Залежність від імпорту зменшить розвиток виробництва спеціалізованих сплавів та металоконструкцій для критично важливих галузей, включно з оборонними. Просування української металопродукції на міжнародних ринках активізує залучення українських виробників до глобальних ланцюгів постачання.



Висновки. ВВМ є прикладом партнерства держави, бізнесу та науки для розвитку металургійної галузі. Запровадження в Україні аналогічної ініціативи може стати важливим кроком для відновлення металургійної та металообробної галузей як основи економічного зростання, інновацій, обороноздатності та підвищення адаптивності до зовнішніх викликів. В промисловій стратегії уряду слід представити метали як життєво важливу частину майбутньої економічної стратегії, яка об'єднуватиме інвесторів, науковців, виробників та споживачів разом з розробкою державних стимулів для використання української металопродукції. Така ініціатива сприятиме відновленню промислового та оборонного потенціалу, створенню нових робочих місць та посиленню економічної безпеки країни.



СЕКЦІЯ 5. АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНЖЕНЕРНОЇ ОСВІТИ. ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ЕЛЕКТРОННОМУ НАВЧАННІ.

Тетяна Кадильникова¹, Галина Сокол², Володимир Дудніков², Олег Юшкевич

¹професор, д.т.н., професор, Дніпровський національний університет імені

Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна, e-mail: kadilnikovatm@ukr.net

²професор, д.т.н., професор, Дніпровський національний університет імені Олеся

Гончара, м. Дніпро, Україна e-mail: gsokol@ukr.net

²доцент, к.т.н., доцент, Дніпровський національний університет імені Олеся

Гончара, м. Дніпро, Україна e-mail: dudvlad1944@gmail.com

²доцент, к.т.н., доцент, Дніпровський національний університет імені Олеся

Гончара, м. Дніпро, Україна e-mail: e.yushkevich@i.ua

ВИРІШЕННЯ СУЧАСНИХ ПРОБЛЕМ ВИЩОЇ ІНЖЕНЕРНОЇ ОСВІТИ НА КАФЕДРІ МЕХАНОТРОНІКИ ДНУ імені ОЛЕСЯ ГОНЧАРА

Анотація. Викладачі кафедри механотроніки фізико-технічного факультету ведуть багато часову педагогічну роботу при читанні лекцій, проведенні практичних та лабораторних занять, керуванні курсовими проектами та контрольно-модульними, розрахунковими роботами. При цьому використовуються сучасні методи математичного моделювання, складання методик розрахунків і проектування конструкцій з використанням новітнього програмного забезпечення, розробкою наглядних методів навчання (презентації, навчальні фільми тощо), використання новітніх методів виготовлення пристроїв на 3Д принтерах. Розробляється методична література. Навчальний процес супроводжується вирішенням сучасних проблем. Це насамперед здійснення навчання дистанційно.

Ключові слова: педагогічна робота, технічні дисципліни, обладнання, комп'ютери, інтернет, 3Д виготовлення пристроїв, сучасні проблеми, дистанційне навчання, Microsoft Office 365, Teams.

Вступ. Україна в сей час являє собою велику державу з потужною промисловою базою. Тому інженерні спеціальності мають велику потребу. Викладачі кафедри механотроніки фізико-технічного факультету ведуть багато часову педагогічну роботу



при читанні лекцій, проведенні практичних та лабораторних занять, проводячи керування курсовими проектами та контрольнo-модульними, розрахунковими роботами. При цьому використовуються сучасні методи математичного моделювання, складання методик розрахунків і проектування конструкцій з використанням новітнього програмного забезпечення, розробкою наглядних методів навчання [1-10]. Навчальний процес супроводжується вирішенням сучасних проблем. Це насамперед необхідність здійснення навчання дистанційно. Тут треба розвинути і опанувати навички використання особливостей сучасного середовища Microsoft Office 365, Teams. Кафедра організує захисти дипломних проектів (кваліфікаційних робіт) бакалаврів та магістрів у дистанційному режимі. Тому актуальність теми доповіді з вирішення сучасних проблем вищої інженерної освіти сумнівів не викликає.

Матеріал і результати досліджень. Викладання інженерних дисциплін ведеться згідно освітньо-професійних програм (ОП) для галузі знань 13 «Механічна інженерія» для спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 Галузеве машинобудування, 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка. ОП для спеціальності 131 «Прикладна механіка» має назву «Інжиніринг механотронних і робототехнічних систем» для першого рівня вищої освіти (бакалаврів). Для другого та третього рівнів вищої освіти (магістрів та навчання на PhD) ОП має назву «Прикладна механіка». Навчання проводиться для денних форм. Дисципліни: обов'язкова чи вибіркова.

Робочі програми курсів схвалюються на засіданнях кафедри механотроніки та науково-методичної ради фізико-технічного факультету, затверджуються відповідними протоколами і підписами відповідальних особистостей. Метою навчальних дисциплін є надання майбутнім спеціалістам фундаментальних знань з теоретичних положень і професійної діяльності в галузі проектування, виробництва та експлуатації механотронних систем, машин і устаткування, робототехнічних комплексів, з розробок методик вивчення та гасіння коливань, з використання сучасних уявлень про технічні системи. Вміти застосовувати в роботах з проектування сучасну комп'ютерну техніку. А також формувати у студентів здатність творчо мислити, вирішувати складні проблеми з організації проектування машин і механізмів з урахуванням досягнень науково-технічного прогресу.

В сей час на кафедрі викладаються курси: Прикладна механіка, комп'ютерна та інженерна графіка, Теорія механізмів і машин, Деталі машин, Акустика та дослідження вібрацій у машинах, Методологія та організація наукових досліджень, Початок та розвиток наукових досліджень, Математичне моделювання та комп'ютерні технології у



прикладній механіці, Нарисна геометрія та інженерна графіка, Програмування в механіці механотронних систем, Основи розрахунку гідро- та пневмосистем із використанням сучасних програмних комплексів, Взаємозамінність та технічні вимірювання, Основи пакета прикладних програм для вирішення задач технічних розрахунків, Гідравліка, гідро- та пневмоприводи, Мікропроцесори, пристрої електроніки та автоматики, Основи проектування механотронних і робототехнічних систем, Основи метрології та електричних вимірювань, Управління механотронними системами, Теорія керування, Автоматизація виробничих процесів, Системи керування виробничими роботами, Інформаційні пристрої механотронних систем, Проектування механотронних виробів в системі Autodes, Електричні приводи механотронних систем, Твердотільне комп'ютерне моделювання в САПР, Управляючі цифрові пристрої, Пристрої електроніки та автоматики, Динаміка маніпуляторів, Основи наукових досліджень, Моделі та методи спеціальних розділів прикладної механіки.

Наведемо для прикладу викладання курсу теорія механізмів і машин [1-5]. Курс читається для студентів, що проходять навчання на бакалавра. У лекціях викладені всі розділи курсу, що є класичними. Студентам у просторі Teams викладені не тільки списки, а і повні тексти самих джерел літератури для вивчення програмного середовища AutoCad при виконанні завдань. ОП заплановане виконання студентами у рамках самостійної роботи контрольно-модульних (КМР), графічно-розрахункових (ГР), курсових робіт (КР) та курсових проектів (КП) тощо. Тому опубліковані та викладені у середовищі Teams, в репозиторії університету методичні вказівки з виконання індивідуальної та самостійної роботи. Навчальні посібники мають номери ISBN[1-6].

Структури навчальних дисциплін містять змістові модулі. Тут наведені за темами переліки лекцій, практичних і лабораторних занять, теми самостійної та індивідуальної роботи. Використовуються методи навчання: інтерактивне (активне залучення здобувача вищої освіти до навчального процесу під час дискусій, бесід); словесні методи (пояснення); наочні методи (презентації, фільми [7]); практичні методи (виконання практичних робіт, і в разі сучасного обладнання типу 3Д принтерів [10]); контекстне (інтеграція результатів діяльності здобувача: тобто навчальної, наукової і практичної – та їх використання під час виконання самостійного наукового дослідження); методи аналітичного – інтелектуальна діяльність здобувача, прийняття правильних рішень; самостійне (опанування завдань для самостійної роботи у результаті аналізу та переосмислення літератури).



У робочих програмах курсів наведені схема формування оцінки та шкала відповідності оцінювання. Проводиться оцінка знань за поточним контролем та семестровим контролем. Тому студенти мають доступ до принципів оцінювання їх знань. Розроблені критерії оцінювання знань здобувачів з виставленням балів за визначеною шкалою. Наведені форма і строки оцінювання індивідуальних і самостійних робіт, (тижні викладання), максимальна кількість балів за виконану роботу. Студенти використовують інструменти та обладнання: Персональні комп'ютери, ноутбуки, 3D принтери. Програмне забезпечення: AutoCad, MS Office 365, MS Teams, MS Forms, MS PowerPoint, MS SharePoint, Zoom, Програмний комплекс “Математичний конструктор 1С”, Компас 3Д.

Висновки. Наведені науково-педагогічні дані про вирішення сучасних проблем у вищій інженерній освіті викладачами кафедри механотроніки ДНУ імені Олеся Гончара.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ (ВІДПОВІДНО ДО АРА)

1. Сокол Г. І. (2002). Теорія механізмів робототехнічних систем. Кінематика. Дніпропетровськ: РВВ ДНУ.
2. Сокол Г. І., Алексєєнко С. В. (2021). Презентація до курсу «Динамічний аналіз механізмів». Навчальний посібник із складання інтерактивної презентації. Дніпро: Поліграфцентр «Формат».
3. Сокол Г. І., Дудніков В. С., Алексєєнко С. В. (2010). Зубчасті передачі. Теорія, завдання та лабораторні роботи. Навчальний посібник. Дніпропетровськ: РВВ ДНУ.
4. Сокол Г. І., Дудніков В.С. (2014). Проектування плоских важільних механізмів з використанням AUTOCad. Навчальний посібник. Д.: Поліграфія.
5. Сокол Г.І., Алексєєнко С. В., Давидова А. В., Хоріщенко О. А. (2015). Проектування та розрахунки зубчастих передач з використанням комп'ютерних технологій. Навчальний посібник. Д.: ЖурФонд.
6. Джур Є. О., Сокол Г. І, Горбенко Є. В., Рибалка Т. В. (2012). Розрахунок коливань та дослідження динамічних процесів у системі металорізальних верстатів. Навчальний посібник. Дніпропетровськ: ДНУ.
7. Лекція для школярів обласної аерокосмічної школи (2019). Дніпро «Стопоходяча машина П. Л. Чебишева», (інтернет ресурс https://www.youtube.com/watch?v=MyHs4_Lwq88&list=PLFMog26HZeYOGq-ksUWwr-74BXmZEaRXD&index=7&t=25s).



8. Максимова Д. В., Сокол Г. І. (2022). Коливання в ходових частинах планетоходів *XXIV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос» 25-27 травня 2022р, Дніпро*. Дніпро, НЦАОМ. (с. 14).
9. Снобко Д. О., Сокол Г. І. (2023). Розрахунок механічних характеристик тіл космонавтів методом електромеханічних аналогій. *XXV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос» 12- 14 квітня 2023р., Дніпро*. Дніпро, НЦАОМ. (с. 12).
10. Сокол Г. І., Алексєєнко С. В., Федоріна В. В. (2023). 3D технології при виконанні деталей у робототехніці. *Виклики та проблеми сучасної науки [Електронний ресурс] CIMS.*: Дніпро : [б. в.]. Т. 1. Режим доступу: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22886720>. (с. 286-288).



Раціна Тетяна

*методист I категорії навчально-методичного відділу НТУ**«Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail: Ratsyna.T.V@nmu.one*

ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО ВИРІШЕННЯ СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ ІНЖЕНЕРНОЇ ОСВІТИ

Анотація. Визначені основні виклики, з якими стикаються заклади вищої освіти в умовах швидкого розвитку технологій та змін ринку праці. Запропоновано низка підходів для подолання труднощів, таких як модернізація навчальних програм, впровадження віртуальних лабораторій, використання хмарних технологій, активізація співпраці з промисловістю та посилення міжнародної кооперації.

Ключові слова: навчальні програми; інженерна освіта; штучний інтелект; хмарні сервіси; конкурентоспроможність; дистанційне навчання, новітні технології.

Інженерна освіта є важливою складовою підготовки фахівців, здатних вирішувати складні технічні проблеми та розробляти інноваційні рішення для різних галузей. Інженери грають ключову роль у розвитку промисловості, будівництва, ІТ-сектору, енергетики та інших сфер, що робить освіту в цій галузі критично важливою для сталого розвитку економіки. Вони повинні розуміти процеси інновацій та вміти застосовувати новітні технології у своїй роботі. Важливим аспектом інженерної освіти є навчання на практичних прикладах, використання лабораторних досліджень, проектів та стажувань. Здобувачі повинні отримувати досвід роботи з реальними технологіями та інструментами.

Проблеми вищої інженерної освіти є однією з ключових тем, які обговорюються в контексті модернізації навчальних програм і підготовки фахівців до потреб сучасного ринку праці. Сучасна інженерна освіта стикається з низкою викликів, які обумовлені швидким розвитком технологій, глобалізацією, зміною вимог до спеціалістів та загальною трансформацією освіти. Особливість підготовки фахівців інженерних спеціальностей полягає в тому, що, безперечно, провідним у цьому процесі є формування професійних компетентностей у галузі фундаментальних наук, інженерного аналізу, інженерного проектування, досліджень, інженерної практики, а меншою мірою – універсальних і особистісних компетентностей. Підготовка сучасного інженера



спрямована на розвиток пізнавальних здібностей особистості, її світогляду, моральності, професійної культури.

Впровадження дистанційного інженерного навчання під час воєнного часу відкриває можливості для продовження освітнього процесу навіть в умовах кризових ситуацій. Ключовими аспектами стають забезпечення безперервності навчання, адаптація навчальних програм до цифрових форматів і підтримка взаємодії між здобувачами. Дистанційне навчання дає змогу впроваджувати інноваційні технології навчання, здобувати повноцінну освіту. Саме інноваційні технології є невичерпним джерелом пізнавальної активності студентів, розвитку їхніх творчих здібностей, умінь та навичок, інтересів та інших інтелектуальних чинників. За словами І. Дичківської, інноваційне навчання – зорієнтоване на динамічні зміни в навколишньому світі навчальна діяльність, яка ґрунтується на оригінальних методиках розвитку різноманітних форм мислення, творчих здібностей, високих соціальноадаптаційних можливостей особистості [1].

Вища інженерна освіта стикається з викликами, які впливають на підготовку майбутніх інженерів і потребують адаптації навчальних програм до сучасних умов. Ці виклики пов'язані з технологічними змінами, глобалізацією, швидкими темпами розвитку інновацій, а також зі зміною потреби праці. Основні виклики інженерної освіти, які необхідно впровадити до навчального процесу та підходи до їх вирішення:

- необхідність постійного оновлення навчальних програм для відповідності сучасним вимогам і включення інноваційних технологій. Впровадження динамічних, адаптивних навчальних планів з фокусом на новітні технології, такі як штучний інтелект, Інтернет речей, автоматизація та цифрові двійники. Це дозволяє адаптувати навчальний процес до нових викликів ринку праці та забезпечити студентів навичками, необхідними для успішної професійної діяльності;
- недостатній доступ до сучасного обладнання, лабораторій та інструментів обмежує можливості для практичного навчання, тому використання віртуальних лабораторій та симуляцій дозволять здобувачам проводити лабораторні роботи та експерименти в інженерних, наукових і технічних дисциплінах без необхідності фізичної присутності в реальній лабораторії. Вони стали елементом дистанційного навчання, особливо в інженерних дисциплінах, де практичні навички здійснюють ключову роль. Хмарні послуги є ключовим елементом цифрової трансформації, забезпечуючи зручність, гнучкість і масштабованість для бізнесу, освіти та інших сфер [2];
- штучний інтелект допоможе персоналізувати навчання для кожного



здобувача, адаптуючи завдання відповідно до їхнього прогресу. ШІ-алгоритми можуть давати індивідуальні рекомендації, аналізувати помилки студентів і пропонувати додаткові матеріали для вивчення;

- недостатня кількість практичних занять та проєктів у навчальних програмах

може призвести до недостатньої підготовки випускників до реальних виробничих завдань. Часто інженерна освіта орієнтована на теоретичну підготовку, тоді як реальні виклики на виробництві вимагають практичних знань і досвіду. Збільшення кількості практичних завдань, лабораторних робіт та проєктів у співпраці з підприємствами. Інтеграція стажувань та практики в навчальний процес;

- недостатня інтеграція міждисциплінарних знань. Сучасні інженерні проблеми

часто потребують не лише технічних, але й міждисциплінарних знань. Проте навчальні програми часто фокусуються виключно на спеціалізованих технічних навичках, ігноруючи потребу в знаннях з інших сфер, таких як управління проєктами, економіка, екологія та соціальні науки. Необхідно створювати програми, які поєднують інженерію з іншими дисциплінами (наприклад, інженерія та управління, інженерія та екологія). Підготовка здобувачів до роботи в міждисциплінарних командах;

- глобалізація та міжнародна конкурентоспроможність. Глобалізація означає, що інженери повинні бути готовими працювати у міжнародному середовищі, дотримуватися міжнародних стандартів та бути конкурентоспроможними на світовому ринку праці. Включення до програм курсів з міжнародних стандартів, мовної підготовки та культурної грамотності. Співпраця з міжнародними університетами для обміну досвідом та знаннями;

- обмежені ресурси для модернізації лабораторій, впровадження новітніх технологій та забезпечення інноваційного навчання. Залучення приватного сектору та державних грантів для фінансування освітніх програм, а також партнерство з підприємствами для забезпечення матеріально-технічної бази.

Інженерна освіта стикається з численними викликами, які вимагають змін і адаптації до сучасних реалій. Для підготовки конкурентоспроможних фахівців необхідно впроваджувати новітні технології, орієнтуватися на практичну підготовку, враховувати глобальні виклики та забезпечувати міждисциплінарний підхід до навчання. Важливо створювати адаптивні та інклюзивні освітні середовища, які будуть враховувати



специфіку інженерної освіти, зокрема, практичну спрямованість навчання, а також забезпечувати психологічну підтримку здобувачам і викладачам у ці складні часи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дичківська, І.М. (2004). Інноваційні педагогічні технології: навч. посіб. Київ: Академвидав.
2. Гуржій, А.М., & Лапінський, В.В. (2013). Електронні освітні ресурси як основа сучасного навчального середовища загальноосвітніх навчальних закладів. Інформаційні технології в освіті. (Вип. 15).



Дербабa В.А.¹, Рубан В.М.², Трубін А.В.³, Зевако В.С.⁴

¹завідувач кафедри, к.т.н., доцент, НТУ «ДП», Дніпро, Україна, e-mail: derbaba.v.a@nmu.one;

²доцент, к.т.н., НТУ «ДП», Дніпро, Україна, e-mail: ruban.v.m@nmu.one;

³начальник відділення інформаційних технологій ДП «КБ «Південне», Дніпро, Україна, e-mail: info@yuzhnoye.com;

⁴головний науковий співробітник ДП «КБ «Південне», к.т.н., доцент, Дніпро, Україна, e-mail: info@yuzhnoye.com.

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ AUTODESK В ІНЖЕНЕРНІЙ ОСВІТІ

Анотація. Розглянуто особливості впровадження програмних продуктів Autodesk у процесі стажування та підвищення кваліфікації викладачів спеціальності Прикладна механіка на кафедрі технологій машинобудування та матеріалознавства Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Ключові слова: Autodesk Inventor, Autodesk Vault, прикладна механіка, програмне забезпечення, технології машинобудування.

Вступ. Сучасний світ характеризується швидким розвитком інформаційних технологій, що відкриває безмежні можливості для зв'язку, обміну знаннями та доступу до інформації [1].

Науковий доробок, у якому окреслено проблеми функціонування системи вищої освіти, представлений великою кількістю робіт вітчизняних дослідників [2].

Суспільство і державу складно уявити без належної уваги до освіти та науки, які є важливим рушієм суспільного прогресу та економічних, соціальних і правових зрушень. Освіта та наука є ключовими чинниками, що впливають на рівень та якість життя громадян [3].

Матеріал і результати досліджень. Складовою робочого місця здобувача галузі знань механічна інженерія є персональний комп'ютер із спеціалізованим програмним забезпеченням, зокрема програмними продуктами, які дають змогу автоматизувати проектування і підготовку виробництва.

Розглянемо деякі особливості та технологію проектування, реалізовані в Autodesk.



Машинобудівні підприємства розпочали впровадження систем управління життєвим циклом виробу PLM (Product Lifecycle Manager). Важливим компонентом PLM є система управління проектними даними - якою є Autodesk Vault.

Autodesk Vault - інструмент управління даними, інтегрований з продуктами Autodesk Inventor Series, Autodesk Inventor Professional, AutoCAD Mechanical, AutoCAD Electrical, Autodesk Revit і Civil 3D. Це допомагає проектним командам відстежувати роботу та підтримувати контроль версій у багатокористувацьких середовищах. Це дозволяє їм організовувати та повторно використовувати проекти, консолідуючи інформацію про продукт та зменшуючи необхідність повторного створення конструкцій з нуля. Користувачі можуть зберігати та шукати як дані CAD (такі як файли Autodesk Inventor, DWG та DWF), так і документи без CAD (такі як файли Microsoft Word та Microsoft Excel) [4, 5].

Autodesk Vault - це система перевірки файлів, яка «записує» прогрес всіх змін у файлі. Всі файли та пов'язані з ними метадані індексуються в базовій системі керування даними і доступні для пошуку за допомогою клієнтського інтерфейсу Vault. Робота зі сховищами нагадує роботу з файловою системою: сховища можна створювати, видаляти, змінювати місце їхнього розташування тощо (рисунок 1).

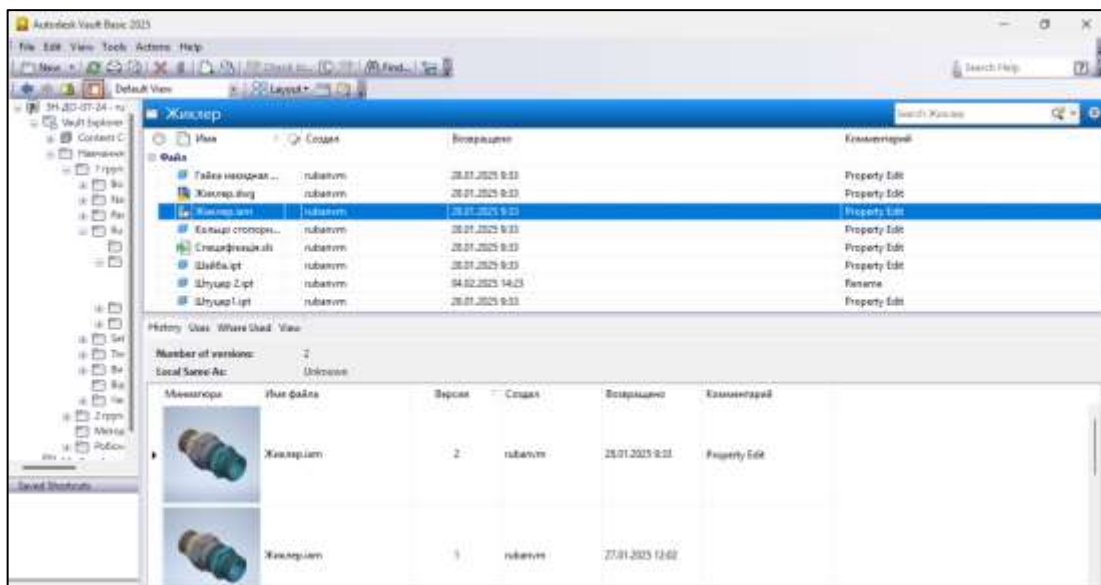


Рисунок 1 – Інтерфейс програми Autodesk Vault

Із кожною версією файлу Autodesk Vault зберігає дані про те, хто і коли змінив файли, які файли прикріплені і куди вони входять, що прискорює пошук і покращує управління даними.



Система Autodesk Vault тісно інтегрована з Autodesk Inventor. Після інсталяції в інтерфейсі Autodesk Inventor з'являються елементи керування файлами і оглядач Vault-проекту.

Autodesk Inventor [6] - це програмне забезпечення, спрямоване на проектування великих збірок, які включають тисячі або десятки тисяч елементів. Завдяки адаптивному механізму управління даними Autodesk Inventor підтримує сегментовану базу даних і її швидке завантаження до виконання. Усуваючи необхідність розбивати проект на досить дрібні частини, Autodesk Inventor збільшує швидкість і точність створення проекту. Унікальні можливості - адаптивні шари, так звані візуальні екрани, доступні компоненти, відстеження дизайну і паралельна робота над проектом - розширюють межі і досвід розробки великих проектів.

Autodesk Inventor використовує різні формати файлів для 3D-деталей, що дозволяє налагодити безпосередню інтеграцію з AutoCAD і спеціалізованими галузевими додатками на його основі, в зокрема, AutoCAD Mechanical. Autodesk Inventor (рисунк 2) може обмінюватися даними з такими додатками як CATIA V5, UGS, SolidWorks, Pro / ENGINEER, Ansys. Програма підтримує імпорт та експорт файлів CATIA V5, JT 6, JT 7, Parasolid, Granite, UG-NX, SolidWorks, Pro / E, і SAT [7].

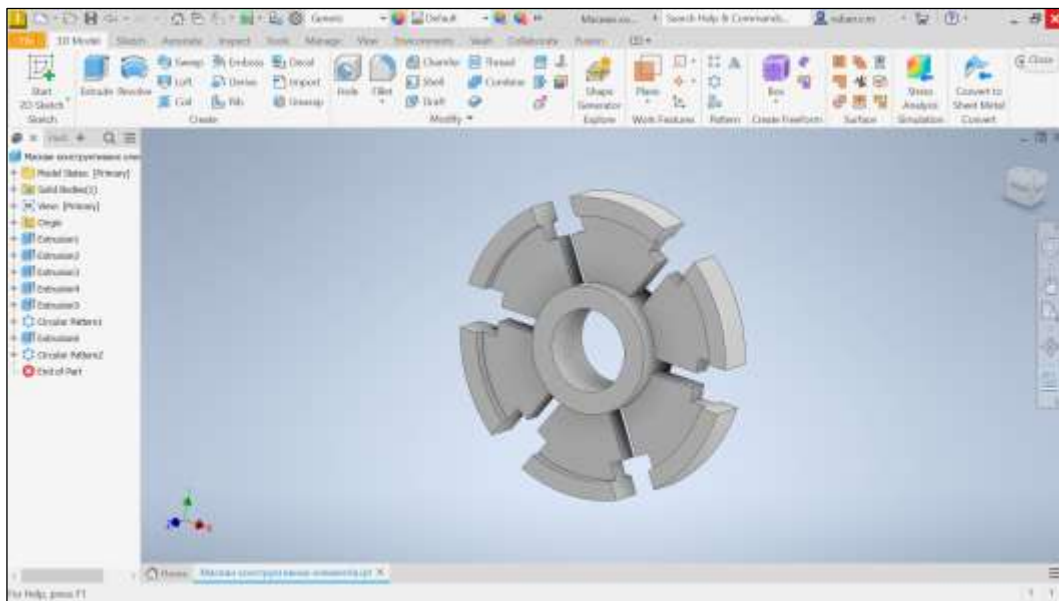


Рисунок 2 – Візуалізація 3D моделі виконаної Autodesk Inventor

Існуючий конструкторський проект можна помістити в сховище. Для цього необхідно перетворити файл проекту Inventor у файл проекту Vault, пов'язаний зі сховищем, а потім додати цей проект у сховище. Усі деталі, збірки, креслення та інші



супровідні документи активного проекту будуть додані в сховище одночасно з проектом. Щоб забезпечити підтримку зав'язків між файлами моделей Autodesk Inventor, їх необхідно додавати в сховища тільки за допомогою Autodesk Vault.

Висновки. Однією з вимог до здобувачів спеціальності «Прикладна механіка» є вміння працювати з сучасними CAD/MCAD, зокрема з Autodesk Inventor. Завдяки відкритій політиці Autodesk викладачі і здобувачі університетів мають можливість використання програмних продуктів Autodesk в освітньому процесі. Навички роботи з Autodesk Inventor є корисними для студентів починаючи з 1-го курсу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Редзюк В., Редзюк Н. (2023). Сучасні проблеми інформаційної безпеки України та напрями їх вирішення. *Публічне управління: концепції, парадигма, розвиток, удосконалення*, (3), 59–65. <https://doi.org/10.31470/2786-6246-2023-3-59-65>
2. Сиченко В.В. , Шевченко О.О., Рибкіна С.О. Проблеми системи вищої освіти в Україні та шляхи їх вирішення в післявоєнний період. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Публічне управління та адміністрування. Том 33 (72) № 6 2022. 149-155. DOI <https://doi.org/10.32782/TNU-2663-6468/2022.6/23>
3. Силантьєв Д., Іншин М. Суспільство/Вища освіта в умовах сьогодення: проблеми та перспективи URL: <http://www.golos.com.ua/article/308165>
4. Key features of Autodesk Vault URL: <https://www.autodesk.com/eu/products/vault/features>
5. Autodesk Vault URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Vault
6. Autodesk Inventor: 3D modeling software for designers and engineers URL: <https://www.autodesk.com/eu/products/inventor/overview>
7. Autodesk Inventor URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Inventor



Дегтярьов М.О.¹, Юрчак О.В.², Парамонов О.Г.³, Потапович Л.П.⁴, Трубін А.В.⁵,
Дейнеко Л.М.⁶, Зєвако В.С.⁷

¹Генеральний конструктор - перший заступник Генерального директора ДП
«КБ «Південне», к.т.н., Дніпро, Україна, e-mail:info@yuzhnoye.com;

²Генеральний директор Асоціації підприємств промислової автоматизації
України, Київ, Україна, e-mail:yurchak.alexandre@appau.org.ua;

³Комерційний директор ПрАТ «Аркада», Київ, Україна,
Alex.Paramonov@arkada.com.ua

⁴Учений секретар – начальник науково-освітнього центру ДП «КБ «Південне»,
к.т.н., Дніпро, Україна, e-mail:info@yuzhnoye.com;

⁵Начальник відділення інформаційних технологій ДП «КБ «Південне», Дніпро,
Україна, email:info@yuzhnoye.com;

⁶Інженер I-ої категорії ДП «КБ «Південне», Дніпро, Україна, e-
mail:info@yuzhnoye.com;

⁷Головний науковий співробітник ДП «КБ «Південне», к.т.н., доцент, Дніпро,
Україна email:info@yuzhnoye.com;

СТВОРЕННЯ СУЧАСНОЇ МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ З ВИКОНАННЯ ПРОЄКТІВ

Анотація: Пропонується методика навчання з виконання проєктів в середовищі PDM-системи та з використанням продуктів Autodesk і Microsoft. Методику було створено та відпрацьовано фахівцями ДП «КБ «Південне» за участю викладацького складу з шести профільних технічних ЗВО України. Співпраця показала гарні результати. Робота продовжується у напрямку створення загальної інформаційної платформи ЗВО в межах України.

Ключові слова: інформаційні технології, цифровізація, методика навчання, спеціалізований курс навчання,

У теперішній час основним трендом розвитку суспільства є новий підхід до виробництва під загальною назвою «Індустрія 4.0», або «Четверта промислова революція», який декларує всеосяжну цифровізацію виробничих процесів, що реалізується через «інтернет речей».

Вирішення питань цифровізації будь якого підприємства дозволяє:



- підвищити швидкість розробки продукції, покращення її якості за рахунок прискорення обміну інформацією між всіма учасниками процесу;
- застосування сучасних методів керування даними та їх аналіз для поточного приймання рішень;
- забезпечення конкурентоспроможності підприємства на світовому ринку.

Головною складовою для досягнення цілі є технічне оснащення підприємства і кваліфікація його персоналу всіх рівнів.

Виходячи з цього, ДП КБ «Південне» налагодило зв'язки з Асоціацією підприємств промислової автоматизації України (АППАУ), що провадить навчання за освітніми програмами з сучасних технологій, ІТ – технологій, технологій Індустрія 4.0., а також співпрацю з представництвом Autodesk в Україні, його партнерами, та з провідними профільними ЗВО України. Це дозволило, з одного боку, одержувати суттєву допомогу в отриманні сучасного програмного забезпечення, а з іншого - мати можливість відпрацьовувати результати роботи у середовищі професійних викладачів. Таким чином, було розроблено та випробувано методику навчання з виконання проектів в середовищі PDM-системи з використанням продуктів Autodesk і Microsoft.

Методика навчання передбачає засвоєння учнями низки курсів за напрямками, в залежності від специфіки та рівня виробничих задач, які необхідно вирішити. Таким чином, створено можливість формувати та викладати спеціалізовані курси навчання виходячи з виробничих потреб.

Серед спеціалізованих курсів навчання такі:

- поняття принципів організації роботи в єдиному інформаційному просторі проекту;
- одержання навичок централізованого використання даних і бібліотек у проекту;
- налагодження та адміністрування сховища Vault, аналіз стану виконання робіт:
- навчання колективній роботі в Autodesk Vault з використанням методів каркасного моделювання;
- розуміння шаблонів проекту, пошук і аналітика в PDM-системі та низка інших.

До кожного з курсів навчання розроблено методичні матеріали у вигляді посібників, файлів MS Word, мультимедійних лекцій з прикладами, завдання для перевірки знань з самостійним або колективним виконанням.



Навчання може бути організоване різними способами:

- очне навчання, коли лекції і практичні заняття проходять в аудиторії під керівництвом викладача;
- дистанційне навчання, коли лекції і практичні заняття проходять у будь-яких доступних локаціях під керівництвом викладача;
- синхронне навчання, коли лекції і практичні заняття проходять у будь-яких досяжних локаціях під керівництвом створеної команди з числа учнів, консультування викладачем проходить через електронну пошту або месенджер з підтримкою відео на пристрої учня. Викладач здійснює оцінку виконаних робіт;
- асинхронне навчання передбачає індивідуальне вивчення матеріалів, виконання завдань. Консультації викладача через електронну пошту або месенджер який підтримує відео і встановлений на пристрої учня. Викладач проводить оцінку виконаних робіт.

Не виключається поєднання деяких способів або створення інших. Вибір залишається за споживачем та залежить від його потенційних можливостей.

Стрімкий розвиток інформаційних технологій дозволяє істотно змінити саму модель організації та проведення будь-якого навчання. Замість традиційних з'явилися найсучасніші та найефективніші форми і методи навчання які у своїй основі передбачають постійне відпрацювання та удосконалення. Це торкається не тільки тих, хто пропонує нові підходи й методики, але й тих, хто навчається. Творче поєднання розробників і користувачів надає можливості в обмежений час всім зацікавленим вчити і вчитися одночасно. Під час такої співпраці виникають нові підходи, розширюється тематика, змінюються форми надання та зміст матеріалу, враховуються недоліки та інше.

Зараз навчання пройшли більш ніж 60 викладачів з Дніпровського національного університету ім. О. Гончара, Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут» ім. І. Сікорського», Національного університету «Львівська політехніка», Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Українського державного університету науки і технологій. Одержаний під час такої співпраці досвід, зміст та об'єм необхідного матеріалу, а також методики викладання дозволяють ефективно підвищувати кваліфікацію не тільки працівників будь-якого окремого промислового підприємства та викладачів ЗВО, але також



працівників суміжних підприємств задіяних у виконанні спільних проєктів. Це надає можливості обмежити витрати на доопрацювання документації під час її приймання та запобігати непорозумінням під час формування загального результату.

На теперішній час проводяться роботи щодо розгортання на платформі ЗВО програмнотехнічного комплексу з методичними матеріалами, що є початком створення загальної для всіх зацікавлених ЗВО інформаційної платформи в межах України.



Ірина Мацюк¹, Олександр Твердохліб²

¹доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м.

Дніпро, Україна, e-mail: matsiuk.i.m@nmu.one

²асистент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail:

tverdokhlib.o.m@nmu.one

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ТВОРЧОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТА КРЕАТИВНОСТІ СТУДЕНТІВ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Анотація. У статті розглядаються основні тенденції процесу розвитку творчого потенціалу та креативності студентів інженерних спеціальностей, також показано сучасне розуміння креативності та творчого процесу. Запропоновано можливості виявити і вивчити блоки розвитку креативності та модель навчання, яка сприяє розвитку креативності у студентів інженерних спеціальностей. Показано, що вивчення та використання базових інструментів мислення відкриває для студентів більше каналів для високоефективного мислення, що допоможе їм дізнатися більше про власні творчі здібності та досягти особистого професійного успіху та задоволення завдяки творчій ефективності.

Ключові слова: дизайн мислення, креативність, критичне мислення, творча діяльність, модель мислення, фази творчого процесу

Стрімкий розвиток інноваційних технологій охоплює найрізноманітніші сфери життя. Постійні зміни в суспільстві багато в чому визначають роль освіти в сучасному світі. У міру просування до інформаційного суспільства в галузі освіти з'являються нові методи, напрями і тенденції, продиктовані науково-технічним прогресом. Інформація та нові технології сьогодні відіграють надзвичайно важливу роль у забезпеченні інформаційної взаємодії між людьми. Штучний інтелект та інші сучасні технології в стають помічниками у системі освіти. Навчання починає будуватись навколо нових технологій та інструментів, які роблять процес навчання більш гнучким та індивідуальним. Щороку на ринку праці з'являються нові сфери діяльності та професії, яких не існувало раніше, і загальна картина попиту на спеціалістів змінюється. Проте, на



рину праці, попит на спеціалістів з технічною освітою завжди росте, але сучасні інженери повинні відрізнитись

Під час навчання в університеті здобувачів вищої освіти необхідно надавати більше можливостей для сприяння та виховання креативності майбутніх інженерів [1]. Спеціальність інженера вимагає, щоб вони демонстрували оригінальне та критичне мислення, а також креативність та інноваційність у своїх методологіях [2]. Таким чином, інженерам потрібен творчий розум, щоб досягти прогресивної мети інженерних навичок для розробки нових продуктів чи систем та вдосконалювати існуючі на благо людства [3]. У навчальному процесі необхідно приділити увагу викладанню розвитку та сприянню креативності студентів-інженерів [4]. У статті розглядається сучасне розуміння креативності та творчого процесу, яка сприяє розвитку креативності у студентів інженерних спеціальностей.

Суттєвих змін повинна зазнати методика викладання, яка поєднує пізнавальну та практичну частину, що поєднує навички учнів разом з їх особистими досягненнями, участь у конкурсах, олімпіадах, наукових конференціях, що може стати важливішим за оцінки. Під час навчання здобувач отримує дипломи за перемогу в олімпіадах, нагороди за участь в конкурсах і проєктах, а також створює дизайнерські роботи та виступає з ними, які дають роботодавцю набагато більше інформації про професійну компетентність молодого спеціаліста. Власні проєкти будуть цінуватися більше, ніж суб'єктивні та стандартизовані оцінки, які не можуть дати конкретного уявлення про здібності людини, але мотивують студентів більше ніж отримання знань. Головна мета сучасної системи освіти, навчати молодих професіоналів адаптуватись до умов, що постійно змінюються, навчити мислити і демонструвати свої знання на практиці [5].

Формування та підготовка гідних, конкурентоспроможних інженерних кадрів є як ніколи важливим для економічного розвитку держави. Назріла нагальна потреба саме в широкій підготовці інженерних кадрів. Майбутній інженер повинен добре адаптуватись до будь-якого виробничого середовища. Пошуки в цьому напрямку зумовлюють необхідність дослідження сучасних тенденцій у процесі формування креативності студентів-інженерів.

Матеріал і результати досліджень. На кафедрі конструювання, технічної естетики і дизайну Національного технічного університету “Дніпровська політехніка” в освітню програму навчання бакалаврів запропоновано ввести зміни і додати нову дисципліну “Дизайн мислення для вирішення технічних задач”, яка допоможе розвинути креативність та творчість здобувачів вищої освіти. Креативні інженери повинні мати



можливість досліджувати та ретельно аналізувати наявні дані чи інформацію та генерувати нові рішення конкретних інженерних проблем або виробництва унікального продукту. Творча освіта в інженерній галузі є актуальною у тому сенсі, що вона допомагає задовольнити очікування професійних інженерів, а також завершує інтелектуальний розвиток окремих людей.

Творчість передбачає процес створення та розвитку творчої діяльності, проблеми та питання розвитку творчого процесу описані у [6]. В основі творчого процесу міститься чотири фази, такі як: підготовка, генерація, інкубація та перевірка.

Підготовча фаза включає визначення, переформулювання та переосмислення проблеми або питання. Формулювання проблеми часто важливіше, ніж її рішення, яке може бути просто питанням математичної чи експериментальної майстерності. Порушення нових питань, нових можливостей, розгляд старих проблем під новим кутом зору вимагає творчої уяви та знаменує справжній прогрес у науці, стверджували Ейнштейн та Інфельд. Спосіб постановки проблеми часто відображає мету, яка спрямовує різноманітні засоби мислення на творчі цілі. Наприклад, зміна парадигми від переробки пластику до винаходу нового покоління пластику, що розкладається, відбулася шляхом переформатування питання «як ми утилізуємо пластик?» до «як ми виготовляємо одноразовий пластик?».

Фаза генерації, яку також називають мозковим штурмом, передбачає витрушування всіх асоціативних ідей або концепцій проблеми. Студенти-інженери після того, як визначили, переформулювали та перевизначили проблему чи питання, рухаються до створення якомога більшої кількості рішень. На цьому етапі можна використовувати багато методів креативного мозкового штурму, включаючи картування розуму, символічну аналогію, примусові зв'язки та маніпулятивні дієслова.

Інкубаційна фаза - це період повного розслаблення, наприклад, сну або прийняття душу або розслабленої уваги, наприклад, відпочинок на велосипеді, що дозволяє підсвідомому інтелекту пропонувати рішення. Люди часто генерують потенційну ідею після певного часу інкубації. Наприклад, багато рішень складних завдань часто можна вирішити після перерви в активній роботі.

Етап верифікації включає аналіз, кластеризацію та оцінку всіх рішень чи ідей, а також планування та реалізацію дій. Наприклад, студент-інженер, який намагається вирішити інженерну проблему, починає зі збору всіх можливих причин і рішень шляхом мозкового штурму, а потім аналізує, кластеризує та оцінює рішення на основі свого досвіду та знань. Потім буде обрано декілька найбільш можливих рішень. Далі студент



зосереджується на плануванні дії, наприклад, на плануванні експериментів. Після планування він може рухатися до реалізації дій, необхідних для вирішення проблеми, починаючи з експериментування найбільш можливого рішення.

Оскільки креативність походить від проблем, здається більш природним для студентів інженерних спеціальностей розвивати креативність через практику вирішення проблем, оскільки від них неминуче очікується ефективність і креативність у вирішенні проблем. Навчання студентів системним підходам до вирішення проблем є дуже важливим, тому що розуміння шляхів вирішення проблем може допомогти прояснити, як активізувати творчість студентів. У статті [7], автори запропонували теоретичну модель систематичного шляху вирішення проблеми, починаючи від відчуття існування проблеми і закінчуючи верифікованими рішеннями.

Дональд Трреффінгер зі співавторами повідомили про більш просту версію, яка базується на чотирьох компонентах: розуміння проблеми, генерування ідей, підготовка до дії та підхід до планування [8]. Таким чином, ефективна стратегія навчання полягала б у тому, щоб провести студентів по маршрутах, використовуючи кілька інженерних проблем, щоб продемонструвати корисність і ефективність виконання стратегії. Дотримуючись творчого процесу та систематичних шляхів вирішення проблем, модель творчого навчання, запропонована Дональдом Трреффінгером є потужним інструментом для викладача, щоб стимулювати та розвивати креативність у студентів інженерів. Модель складається з трьох ієрархічних рівнів: вивчення та використання базових засобів мислення; вивчення та практика систематичного процесу вирішення проблем; і робота з реальними проблемами.

У статті, під час вивчення дисципліни “Дизайн мислення для вирішення технічних задач”, запропоновано модель використання основних інструментів мислення. Викладач починає з прямого навчання використанню інструментів мислення, а потім включає ці інструменти у зміст курсу. Відповідно, що студенти повинні знати, як використовувати інструменти конкретно та ефективно, щоб полегшити процес генерації ідей у творчому процесі [9]. Приклади засобів мислення описано у багатьох джерелах. При вивченні дисципліни “Дизайн мислення для вирішення технічних задач” планується використовувати наступні: аналогічне мислення, мозковий штурм, Майнд-мапінг, перелік атрибутів, морфологічні синтези, вимушені стосунки чи зв’язки, контрольні списки ідей, маніпулятивні дієслова.

Аналогічне мислення, це перенесення ідеї з одного контексту в новий. Щоб застосувати цю техніку, студентів заохочують навмисно задавати запитання на зразок



«що ще подібне?», «що зробили інші?», «де я можу знайти ідею?» та «які ідеї я можу змінити, щоб відповісти моїй проблемі?».

Будучи найбільш часто використовуваним інструментом для створення нових ідей, мозковий штурм означає викид ідей про предмет, незалежно від того, наскільки дивними або смішними вони можуть виглядати. Для того, щоб отримати якісний результат, викладач і студенти повинні дотримуватися деяких правил, тобто шести принципів мозкового штурму:

1. Дайте інструкції та підкресліть кількість, а не якість ідей.
2. Поставте складну мету щодо кількості ідей.
3. Попросіть окремих людей, а не групи, генерувати початкові ідеї.
4. Використовуйте групи для об'єднання та вдосконалення ідей.
5. Попросіть людей надати остаточні оцінки та вибрати найкращі ідеї.
6. Зберігайте час для мозкового штурму.

Крім того, викладач повинен заохочувати оригінальність і розробку будь-яких ідей, але не критикувати та оцінювати ідеї, поки не буде зібрано всі відповіді.

Майнд-мапінг, це фактично різновид мозкового штурму, що передбачає відстеження та запис наших думок у малюнках або ескізах, а також у словах. Ця техніка, як правило, відображає наше мислення точніше, ніж мозковий штурм, оскільки ми думаємо як словами, так і картинками. У той час як мозковий штурм або ментальна карта є загальною процедурою, перелік атрибутів є технікою, спеціально орієнтованою на пошук ідей. За допомогою цієї методики студенти починають з ідентифікації всіх характеристик або атрибутів предмету, наприклад, продукту або процесу, який вивчається, а потім придумують способи зміни, модифікації або покращення кожного атрибуту.

Морфологічний синтез і примусові відношення чи зв'язки є фактично розробкою техніки атрибутивного переліку. Після того, як сформовано список усіх атрибутів, необхідних для предмета, студентам пропонується створити підписки атрибутів, додавши якомога більше альтернатив під кожен атрибут, а потім взяти один елемент із кожного підписку та об'єднати їх у нові форми.

Інструмент мислення контрольний список ідей означає створення контрольного списку, який заохочуватиме користувача вивчати різні моменти, області та можливості дизайну предмету. Зразок контрольного списку для вдосконалення пристрою може містити такі записи як, способи використання пристрою в інших цілях, способи



модифікації пристрою, способи перестановки пристрою, способи збільшення обладнання, способи зменшення обладнання.

Подібно до контрольних списків ідей, техніка маніпулятивних дієслів використовує серію дієслів, щоб допомогти побачити предмет з нової перспективи. Можна запропонувати обрати дієслова, які вказують на те, як можна маніпулювати предметом, наприклад, змінити його форму, функцію та розмір. Зразки дієслів можуть бути наступні: збільшувати, зменшувати, змінювати діапазон, змінювати, модифікувати, замінювати, перевертати та комбінувати.

Висновки. Таким чином, у статті показано, що вивчення та використання базових інструментів мислення відкриває для студентів більше каналів для високоефективного мислення. Розуміння креативності та творчого процесу в контексті інженерії має важливе значення для викладача, щоб мати можливість сприяти креативності студентів-інженерів. Окрім навчання студентів виявляти та усувати перешкоди для творчості, викладач може використовувати модель творчого навчання для подальшого сприяння та виховання творчості студентів за допомогою стратегій навчання, орієнтованих на вирішення проблем. Творчість у науці та інженерії може свідчити про те, що потенціал творчості часто дрімає у більшості студентів, і саме викладач зобов'язаний розблокувати бар'єри та розблокувати або розпалити творчість. Навчання з метою сприяння творчості також допоможе студентам дізнатися більше про власні творчі здібності та досягти більшого особистого та професійного успіху та задоволення завдяки творчій ефективності. Запропонована педагогічна модель процесу формування творчого потенціалу майбутніх інженерів в Національному технічному університеті “Дніпровська політехніка”, дозволить у майбутньому підвищити попит на випускників інженерів на ринку праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cropley, D.H. (2015). Promoting creativity and innovation in engineering education, *Psychol. Aesthet. Creat. Arts*, 9 2, 161-171. DOI: 10.1037/aca0000008.
2. Daly, S.R., Mosyjowski, E.A., Oprea, S.L., HuangSaad, A. & Seifert, C.M. (2016). College students' views of creative process instruction across disciplines, *Think. Ski. Creat.* 22, 1-13.
3. Karwowski, M. (2017). Creative Mindsets: Measurement, Correlates, Consequences, *Psychol. Aesthetics, Creat. Arts*, 8 1, 62-70.



4. Waller, D.R. (2016). An Exploration of Students' Perceptions of Attitudes towards Creativity in Engineering Education, *Queen's University*, 2 1, 32-35.
5. Zhou, C. (2012). Teaching engineering student's creativity: A review of applied strategies, *J. Effic. Responsib. Educ. Sci.*, 5 2, 99-114
6. Baillie, C. (2002). Enhancing creativity in engineering students, *Eng. Sci. Educ. J.*, 11, . 185-192.
7. Atwood, S.A. & Pretz, J.E. (2016). Creativity as a factor in persistence and academic achievement of engineering undergraduates, *J. Eng. Educ.* 105, 540-559 DOI: 10.1002/jee.20130.
8. Treffinger, D.J., Isaksen, S.G. & Dorval, K.B. (2000). Creative Problem Solving: An Introduction, *Prufrock Press, Waco, TX* , 11, 67-71.
9. Badran, I. (2007). Enhancing creativity and innovation in engineering education, *Eur. J. Eng. Educ.* 35 2, 573-585. DOI: 10.1016/j.tsc.2017.01.004.

