

INTERNATIONAL CONFERENCE MATHEMATIC PROBLEMS OF THE TECHNICAL MECHANIC

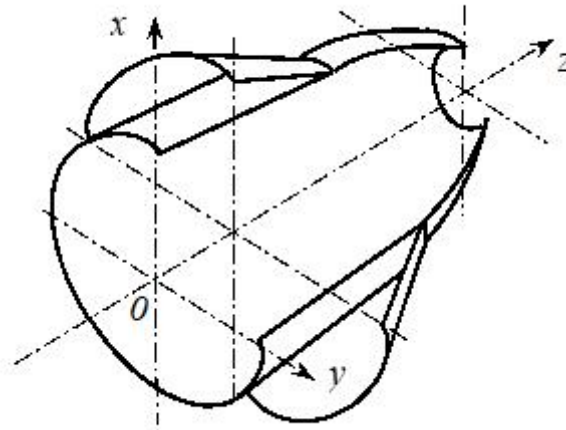
*ANNUAL SCIENTIFIC CONFERENCE
MPTM 2025*

November 13-14, 2025
Dnipro, Ukraine

Book of Abstracts
Part 2

МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ – 2025

Матеріали конференції



Дніпро – 2025

МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ – 2025

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова: Стеблянко П.О.

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

ТЕМАТИКА ДОПОВІДЕЙ

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

ЗМІСТ

<i>Симпозіум (присвячений 90-ій річниці від дня народження академіка В.В. Пилипенка)</i>	сторінки 3 - 24
<i>Секція Механіка</i>	сторінки 25 - 57
<i>Секція Іноваційні технології</i>	сторінки 58- 91

Симпозіум

**«Механіка суцільного середовища і міцності конструкцій»,
присвячений 90-ій річниці від дня народження
академіка В.В. Пулипенка (14 листопада 2025)**

1(31). Стебляк П.О. ЮВІЛЕЙНА МНК МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ (2001-2025)	4
2(58). Пошивалов В.П. АКАДЕМІК НАН УКРАЇНИ В.В. ПИЛИПЕНКО ВІДОМИЙ ВЧЕНИЙ, РАКЕТО- БУДІВНИК, ОРГАНІЗАТОР НАУКИ	8
3(25). Д. В. Гришак, В. З. Гришак, Н. М. Д'яченко, В. О. Купріков ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОЇ АЛГЕБРИ ДО АНАЛІЗУ БІФУРКАЦІЙНОГО СТАНУ ЕКСЦЕНТРИЧНО ПІДКРІПЛЕНИХ СКЛАДЕНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТИПУ «КОНУС-ЦИЛІНДР»	10
4(56). Р.М. Кушнір, М.В. Марчук, Б.Д. Дробенко ПРИНЦИПИ МАТЕМАТИЧНОГО ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ НАВАНТАЖЕНИХ СКЛАДНИКІВ КОНСТРУКЦІЙ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ	12
5(1) Kristoff Muravski, Kyryl Degtiariev, Vasyl Gnitko, Ivan Vierushkin, Olena Sierikova, Marina Chugay and Elena Strelnikova SIMULATION OF CRACK GROWTH IN POWER MACHINERY USING FINITE AND BOUNDARY ELEMENT METHODS	14
6(16) В.М. Назаренко, В.А. Декрет, В.М. Бистров, О.А. Проценко ЛОКАЛЬНА ВТРАТА СТІЙКОСТІ У СКЛОПЛАСТИКУ ПРИ СТИСКУ ВЗДОВЖ ПРИПОВЕРХНЕВОЇ ТРІЩИНИ	15
7(42) Б.Д. Дробенко, Д.В. Клименко, М.В. Марчук, В.М. Сіренко, В.М. Харченко, М.М. Хом'як ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ РАКЕТНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ УТОЧНЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ	17
8(57). І.В. Добров ЩОДО ПИТАННЯ КЛАСИЧНОЇ МЕХАНІКИ ПРО РІВНОМІРНИЙ РУХ ТВЕРДОГО ТІЛА БІЛЯ ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ	18
9(8). О.П. Круковський, С.А. Курносів, Ю.Ю. Буліч, В.О. Хворостян УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ КАПІТАЛЬНИХ ВИРОБОК ПРИ ЇХ ПРОВЕДЕННІ ПО ВИРОБЛЕНОМУ ПРОСТОРУ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЛАВИ	19
10(46). О.Р. Гачкевич, Т.В. Козакевич, Т. Волчанські МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ ФАЗОВОГО ТА НАПРУЖЕНОГО СТАНІВ СТАЛЕВИХ ТІЛ ПРИ ТЕХНОЛОГІЧНОМУ НАГРІВАННІ У ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ	20
11(45). В.А. Максимюк, С.А. Сторожук ПРО ДОСВІД ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУВАННЯ І ВЛАСНИХ ЧАСТОТ РАДІОПРОЗОРОГО ОБТІЧНИКА	21
12(61). Комаров О.В., Шевельова А.Є., Гергель І.Ю., Лобода В.В. СИСТЕМА МІЖФАЗНИХ ТРІЩИН В ОДНОВИМІРНОМУ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОМУ КВАЗІКРИСТАЛІ	22
13(40). Е.Л. Гарт, Б.І. Терьохін ПРО ВПЛИВ ВКЛЮЧЕННЯ ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНОГО МАТЕРІАЛУ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ У ТОНКІЙ ПЛАСТИНІ З КРУГОВИМ ОТВОРОМ ЗА РІЗНИХ ГРАНИЧНИХ УМОВ	23
14(59). А.П. Дзюба, В.М. Сіренко ПРОБЛЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРАХУНКІВ КРИТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАКЕТ-НОСПІВ БЕЗ РУЙНУЮЧИХ ВИПРОБУВАНЬ	24

**ЮВІЛЕЙНА МНК МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ
(2001-2025)**

П.О. Стеблянко

Ювілейна Міжнародна наукова конференція *МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ 2025* присвячується пам'яті людини, яка підтримала ідею і очолила цю конференцію (2001-2015), видатного вченого академіка НАН України Пилипенка Віктора Васильовича (15.11.1935 - 25.05.2015)

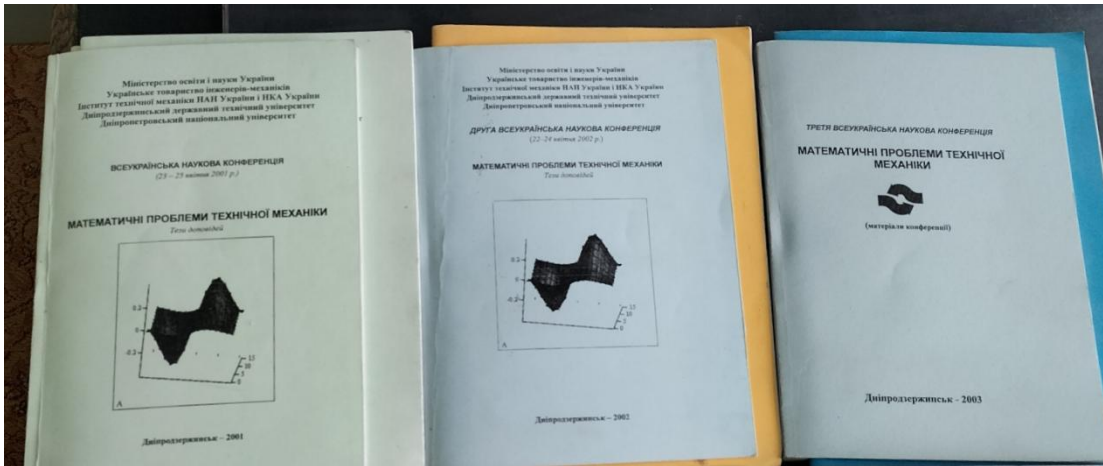


Пилипенко Віктор Васильович

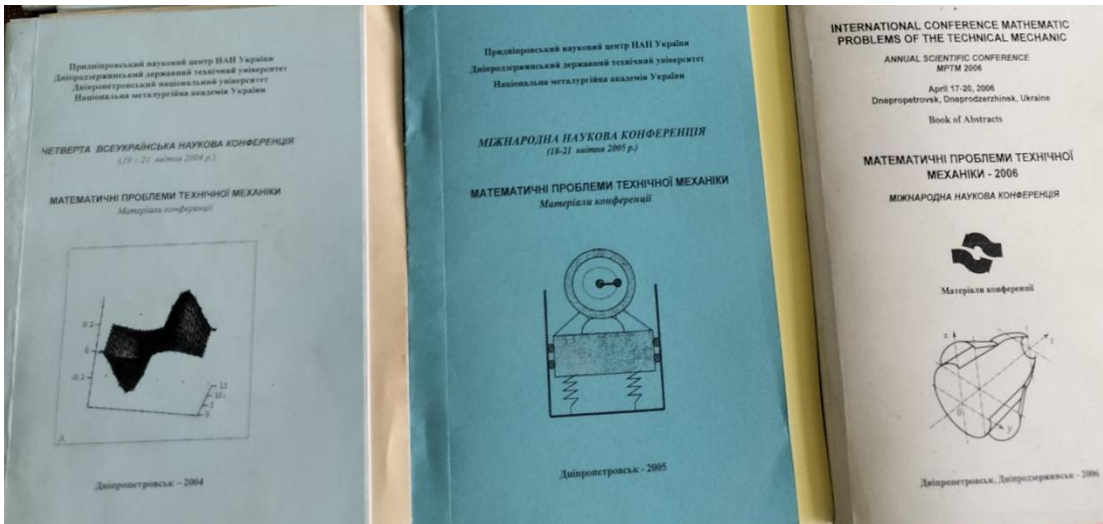
Наукова конференція МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ була започаткована у 2001 році. До 2004 року конференція мала статус Всеукраїнської наукової конференції, а з 2005 року вона проводиться, як Міжнародна наукової конференція. За ці роки (2001-2025 роки) зроблено більш ніж 3700 доповідей, в яких основними учасниками конференції МПТМ були науковці:

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

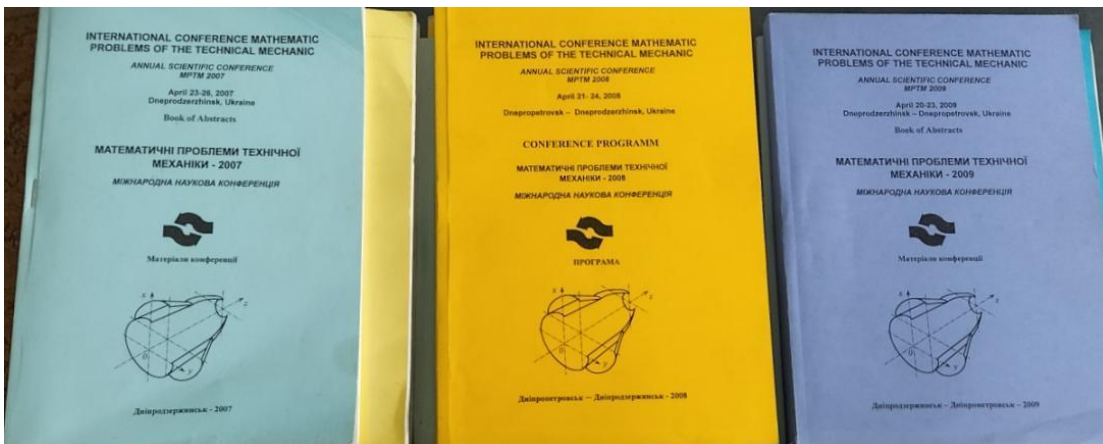
Нижче надано фото матеріалів МПТМ 2001-2025



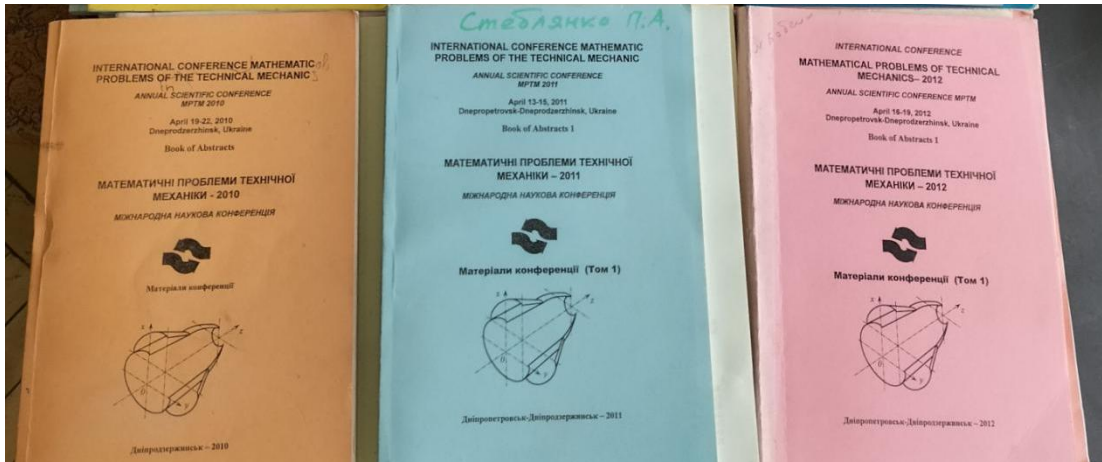
Матеріали МПТМ 2001-03



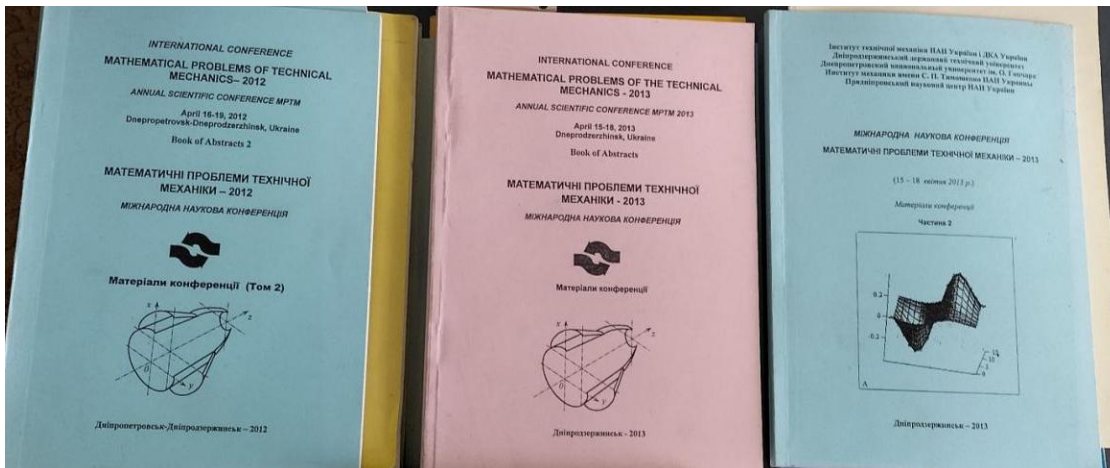
Матеріали МПТМ 2004-06



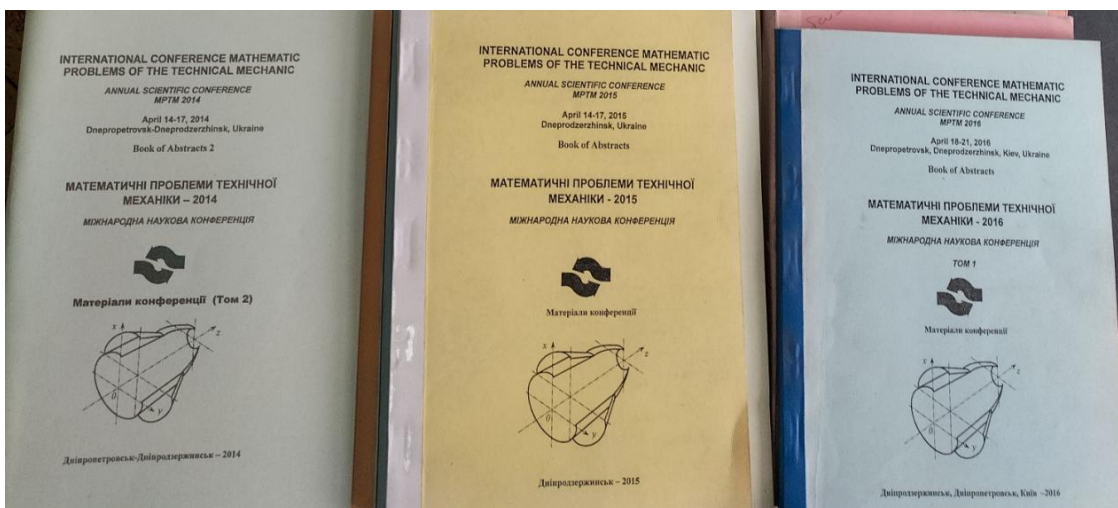
Матеріали МПТМ 2007-09



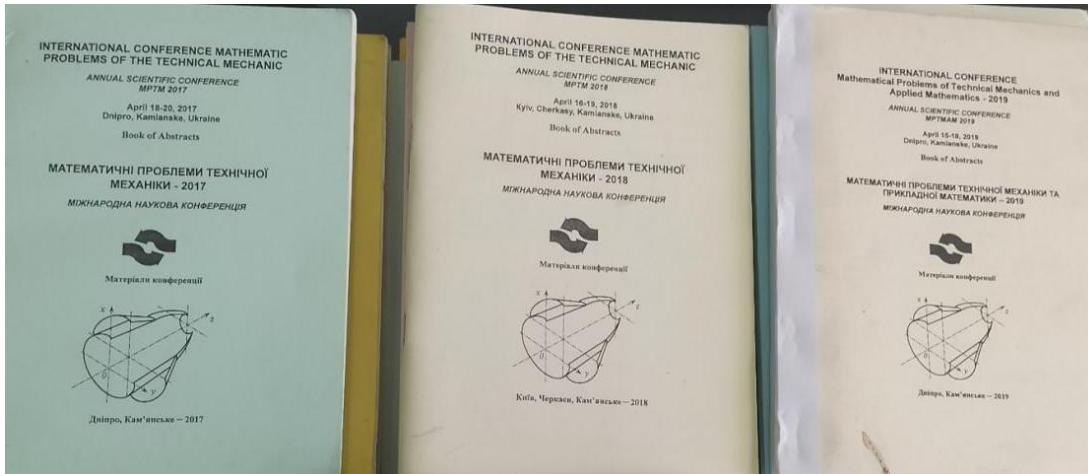
Матеріали МПТМ 2010-12(Частина 1)



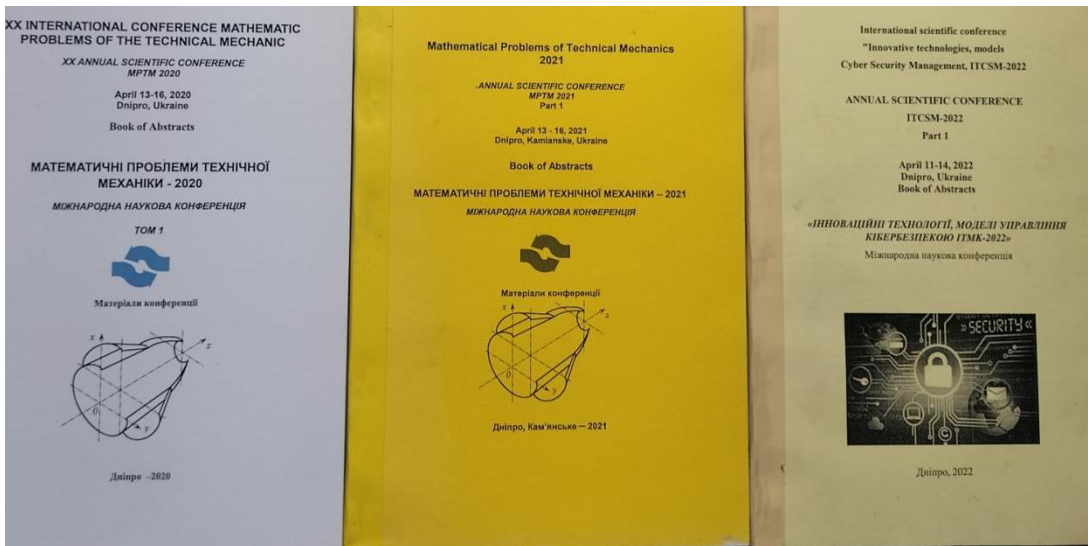
Матеріали МПТМ 2012(Частина 2)-13



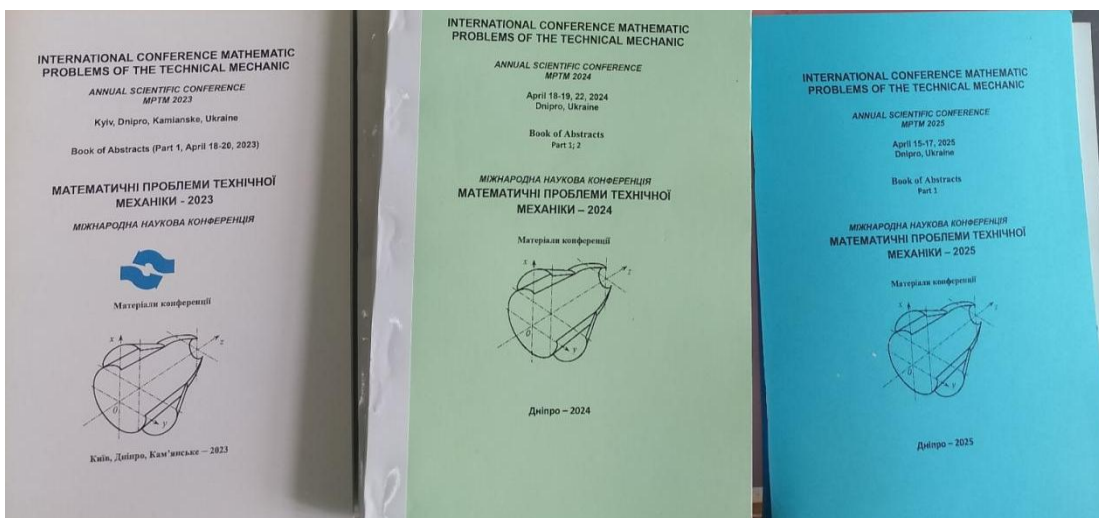
Матеріали МПТМ 2014-16



Матеріали МПТМ 2017-19



Матеріали МПТМ 2020-22(Секція МНК ITCSM-2022)



Матеріали МПТМ 2023-25(Частина 1)

**АКАДЕМІК НАН УКРАЇНИ В.В. ПИЛИПЕНКО ВІДОМІЙ ВЧЕНИЙ,
РАКЕТО-БУДІВНИК, ОРГАНІЗАТОР НАУКИ**

Пошивалов В.П.

Відкриття Симпозіуму

13 листопада 2025 о 14.00 на засіданні Вченої ради (of line)

Інституту Технічної механіки НАНУ і ДКА України

(м. Дніпро, вул. Лешка Попеля, 15, кім. 33)

Приєднання on line за посиланням

<https://us05web.zoom.us/j/84483799751?pwd=PV4hOxxQ4u3Mpk7cRraxz6jVGVb5UIK.1>

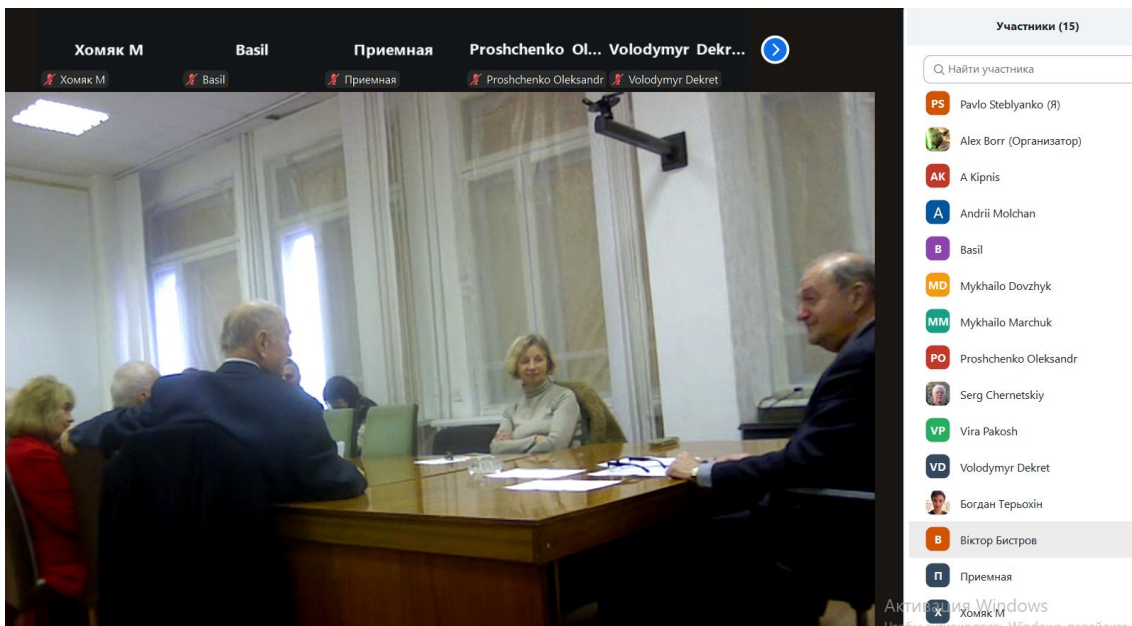
Виступи:

Член.-кор. НАНУ, д.т. н., проф. В. П. Пошивалова,

Член.-кор. НАНУ, д.т. н., проф. А. П. Алпатова,

Д-ра фіз.-мат. наук, с.н.с. О. В. Пироженка,

Спогади колег, співробітників, гостей.





Пленарні засідання
14 листопада 2025 початок о 10.00
в приміщенні Проблемної НДЛ міцності і надійності конструкцій
Ім. акад.. В.І. Моссаковського
(м. Дніпро, пр.. Д. Яворницького, 35, ДНУ, корп.. 5А, кім. 12)
Посилання для приєднання: [Симпозіум «Механіка конструкцій нової техніки»,](#)
[присвячений 90-ій річниці від дня народження академіка В.В. Пилипенка \(14 листопада](#)
[2025\) | Приєднання до наради | Microsoft Teams](#)

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОЇ АЛГЕБРИ ДО АНАЛІЗУ БІФУРКАЦІЙНОГО СТАНУ ЕКСЦЕНТРИЧНО ПІДКРІПЛЕНИХ СКЛАДЕНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТИПУ «КОНУС–ЦИЛІНДР»

Д. В. Грищак⁽¹⁾, В. З. Грищак⁽²⁾, Н. М. Д'яченко⁽³⁾, В. О. Купріков⁽³⁾

⁽¹⁾КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля, ⁽²⁾НТУ «Дніпровська політехніка»,

⁽³⁾Запорізький національний університет

Одним із шляхів підвищення несучої здатності, зокрема стійкості тонкостінних конструкцій і систем нової техніки, при комбінованому зовнішньому навантаженні є застосування складених підкріплених оболонок з повздовжніми та кільцевими ребрами жорсткості [2-6]. Аналітичне виведення розв'язувальних рівнянь для таких конструкцій з урахуванням дискретного розміщення проміжних і стикувальних шпангоутів та ефекту ексцентриситету розташування підкріплюючих елементів є достатньо громіздкою задачею. Використання систем комп'ютерної алгебри [1], зокрема системи Maple, дозволяє автоматизувати у певній мірі даний процес.

У роботі отримані диференціальні рівняння використовуються для числового аналізу стійкості підкріплених складених конструкцій до локальних і загальних форм випинання методом скінченних різниць, що дозволяє визначати критичні навантаження і надає можливість візуалізувати форми хвилеутворення в закритичному стані в залежності від характеру зовнішнього статичного навантаження на базі напівмоментної теорії тонких оболонок [4].

Для розрахунків обиралися односторонні та симетричні по відношенню до серединної поверхні оболонкової системи підкріплення рівної згинної жорсткості.

На рис. 1 представлені граничні лінії, що відокремлюють області стійкості складеної конструкції «конус–циліндр» при осьових зусиллях та зовнішнього тиску з урахуванням жорсткості шпангоутів на згин у площині початкової кривини і крутіння.

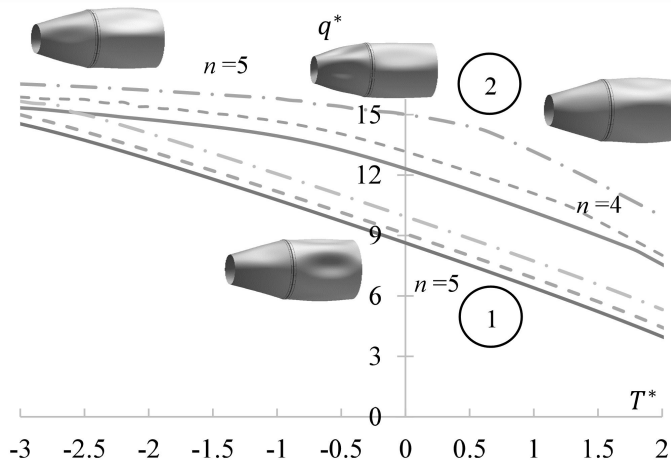







Рис. 1. Граничні лінії, що відокремлюють області стійкості складеної конструкції «конус–циліндр»

Кількість проміжних шпангоутів підібрано таким чином, щоб забезпечити рівностійкість відрізків (для ліній 2). Суцільні лінії відповідають внутрішньому озребренню, штрихові – зовнішньому, штрих-пунктирні – симетричному.

В якості прикладу розглянуто конструкцію з геометричним параметром $L = 5R$ циліндричного відрізу з внутрішнім підкріпленням 10 стрингерами на обох відріках та 3 шпангоутами на кінчному відріку. За відсутності осьового зусилля в табл. 1

наведено параметри поперечного критичного тиску q^* , хвильове число n та закритичні форми досліджуваної системи.

Таблиця 1

	$G_1 = G_2 = 0$			$G_1 = 100, G_2 = 10$	$G_1 = 5000, G_2 = 10$
$k_{cyl, rings}$	20	50	90	90	90
					
q^*	2.1258	3.9524	5.4834	7.7754	8.7749
n	3	3	3	6	3

Числові експерименти свідчать, що для досліджуваного класу складених оболонкових систем зовнішнє оребрння забезпечує вищу стійкість порівняно з внутрішнім. Аналіз біфуркаційних форм системи оболонок підтверджує залежність характеру хвилеутворення від типу оребрння та жорсткості підкріплюючих силових елементів.

Використання системи комп'ютерної алгебри Maple дозволяє автоматизувати виведення рівнянь стійкості складених підкріплених оболонок, спростити аналіз та реалізувати комп'ютерну візуалізацію процесу біфуркації.

Отримані результати можуть служити для визначення раціональних параметрів підкріплених складених конструкцій типу «конус–циліндр» та підвищення їх стійкості при комбінованому навантаженні. Застосований підхід в комбінації аналітико-чисельних методів може бути інтегрованим в системи автоматизованого проєктування для створення конструкцій і систем нової техніки.

Література

1. Гришак Д. В. Комп'ютерна алгебра у розв'язанні прикладних задач механіки конструкцій зі змінними параметрами: монографія. Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2020. 218 с.
2. Degtyarev M. A., Shapoval A. V., Gusev V. V., Avramov K. V., Sirenko V. N. Structural optimization of waffle shell sections in launch vehicles. *Strength of Materials*. 2019. Vol. 51, No. 2. P. 223–230.
3. Gavrilenko G. D., Matsner V. I. Stability of reinforced cylindrical shells under combined loading. *Int. Appl. Mech*, 2011. Vol. 46. P. 1372–1376.
4. Gristchak V. Z., Hryshchak D. V., Dyachenko N. M., Sanin A. F., Sukhyy K. M. Bifurcation state and rational design of three-layer reinforced compound cone-cylinder shell structure under combined loading. *Space Science and Technology*. 2023. Vol. 29. No. 6 (145). P. 26–41.
5. Ifayefunmi O., Ruan D. Buckling of Stiffened Cone-Cylinder Structures Under Axial Compression. *Int. J. Appl. Mech.*, 2022. Vol. 14, No. 7. Id: 2250075.
6. Vol'mir A. S. Stability of Elastic Systems (translation). 1966. 1029 p.



ПРИНЦИПИ МАТЕМАТИЧНОГО ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ НАВАНТАЖЕНИХ СКЛАДНИКІВ КОНСТРУКЦІЙ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Р.М. Кушнір¹, М.В. Марчук^{1,2}, Б.Д. Дробенко¹

¹ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів

²Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

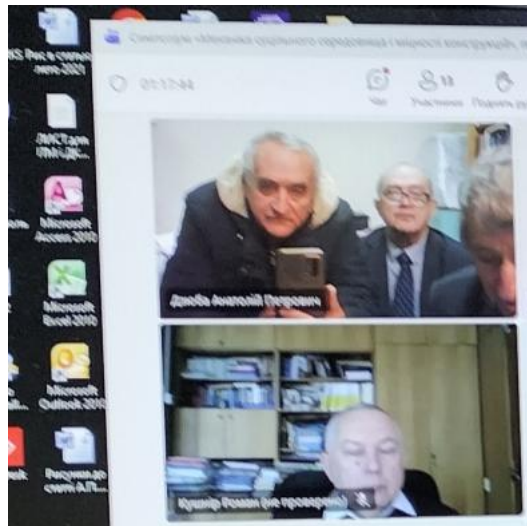
Створення конструкцій ракетно-космічної техніки (РКТ), що найбільш повно відповідають умовам експлуатації, вимогам надійності, а також оптимальності у ваговому співвідношенні, зумовлює як розробку нових матеріалів, методів проектування і розрахунку, так і необхідність вдосконалення як існуючих і вже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

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.

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. Його кінцева мета – ухвалення рішення на основі всебічного аналізу його результатів.

Вище наведені принципи математичного та комп'ютерного моделювання були застосовані 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 [2, 3]. Все це має значний вплив на швидкість і якість проектних розробок.

1. Кононюк, А. Ю. (2012). *Узагальнена теорія моделювання. Основи*. Освіта України.
2. 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.
3. 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.



SIMULATION OF CRACK GROWTH IN POWER MACHINERY USING FINITE AND BOUNDARY ELEMENT METHODS

Kristoff Muravski¹, Kyryl Degtiariev², Vasyl Gnitko², Ivan Vierushkin², Olena Sierikova³, Marina Chugay² and Elena Strelnikova^{2,4,5}

¹*Zelena Gora University, Poland*

²*A. Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems NAS of Ukraine, Kharkiv 61046, Ukraine*

³*Hon. Prof. M.S. Bokarius Scientific Institute, Kharkiv, 61177, Ukraine*

⁵*Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 61166, Ukraine*

⁵*V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv 61000, Ukraine*

This research introduces a comprehensive methodology for estimating the fatigue life of structural components in power engineering systems subjected to cyclic tensile–compressive loading. Special attention is devoted to elements containing stress concentrators, particularly pre-existing or developing cracks [1]. The stress–strain state of such components is analyzed using a combined numerical framework based on the Finite Element Method (FEM) and the Boundary Element Method (BEM), which allows the identification of critical stress zones and the introduction of model cracks at those locations. To characterize crack propagation behaviour, stress intensity factors (SIFs) are evaluated by means of hypersingular integral equation (HIE) formulations [2]. As part of the validation procedure, several benchmark cases are considered, including flat circular (penny-shaped) and rectangular cracks, in order to verify the accuracy, convergence, and reliability of the proposed numerical technique. The originality of this study lies in the consistent application of HIE to both simplified and engineering-level fatigue problems, such as a horizontal fuel tank subjected to harmonic vibration during transport and a steam turbine blade under cyclic mechanical loading. The obtained results reveal that defect-free structures maintain high fatigue resistance under repeated loading cycles. In contrast, the initiation and growth of cracks in regions of elevated stress concentration dramatically shorten the service life of the components. Quantitative estimates of fatigue life for both the cracked fuel tank and the turbine blade are provided, offering an effective practical tool for assessing the remaining life of components operating under cyclic conditions. Detailed numerical simulations of stress concentration in bodies containing circular cracks were carried out using both the BEM and FEM. For comparison purposes, analytical solutions of hypersingular integral equations were also employed. The comparison demonstrates that the one-dimensional HIE ensures very high accuracy in determining stress intensity factors, with minimal computational error. However, its use is restricted to geometrically simple configurations, such as circular or elliptical domains. The two-dimensional HIE, while somewhat less accurate, exhibits much broader applicability and flexibility. The FEM-based computations also produce satisfactory results, though they require significantly greater computational effort. Overall, the conducted analysis confirms the efficiency and reliability of HIE for solving fracture mechanics problems and for obtaining precise values of stress intensity factors. The numerical results obtained can thus be employed as benchmark data for validating other numerical schemes used in fatigue and fracture analyses.

References

1. T. Medvedovskaya, E. Strelnikova, K. Medvedyeva. (2015). FreE. Strelnikova, N. Choudhary, K. Degtyariov, D. Kriutchenko, I. Vierushkin (2024). Boundary element method for hypersingular integral equations: Implementation e Hydroelastic Vibrations of

Hydroturbine Head Covers . *Intern. J. Eng. and Advanced Research Technology (IJEART)*. vol.1(1), pp. 45 - 50. DOI 10.13140/RG.2.1.3527.4961.

2. and applications in potential theory. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 169, 105999, DOI: 10.1016/j.enganabound.2024.105999.

ЛОКАЛЬНА ВТРАТА СТІЙКОСТІ У СКЛОПЛАСТИКУ ПРИ СТИСКУ ВЗДОВЖ ПРИПОВЕРХНЕВОЇ ТРІЩИНИ

В.М. Назаренко, В.А. Декрет, В.М. Бистров, О.А. Проценко

*Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАНУ,
вул. П. Нестерова, 3, Київ, Україна
e-mail: numer@inmech.kiev.ua*

Впровадження волокнистих композитів, зокрема склопластиків (GFRP, Glass Fiber Reinforced Polymer), в авіації та ракетобудуванні є ключовим напрямком сучасної інженерії. Завдяки малій вазі, високій міцності та стійкості до корозії, склопластики дозволяють знизити масу конструкцій, підвищити паливну ефективність і надійність, що особливо важливо для аерокосмічної галузі. Однак, незважаючи на очевидні переваги, композити схильні до утворення різноманітних дефектів під час виробництва та експлуатації, зокрема, приповерхневих тріщин, які можуть ініціюватися ударними навантаженнями, втомую матеріалу або технологічними недоліками. Наявність таких дефектів може істотно знизити несучу здатність та довговічність конструкційних елементів, особливо в умовах стиску. Традиційні підходи до механіки руйнування, які ґрунтуються на теорії розкриття тріщин, часто виявляються недостатніми для опису поведінки композитів під стискаючими навантаженнями, що створює значні ризики для безпечної експлуатації.

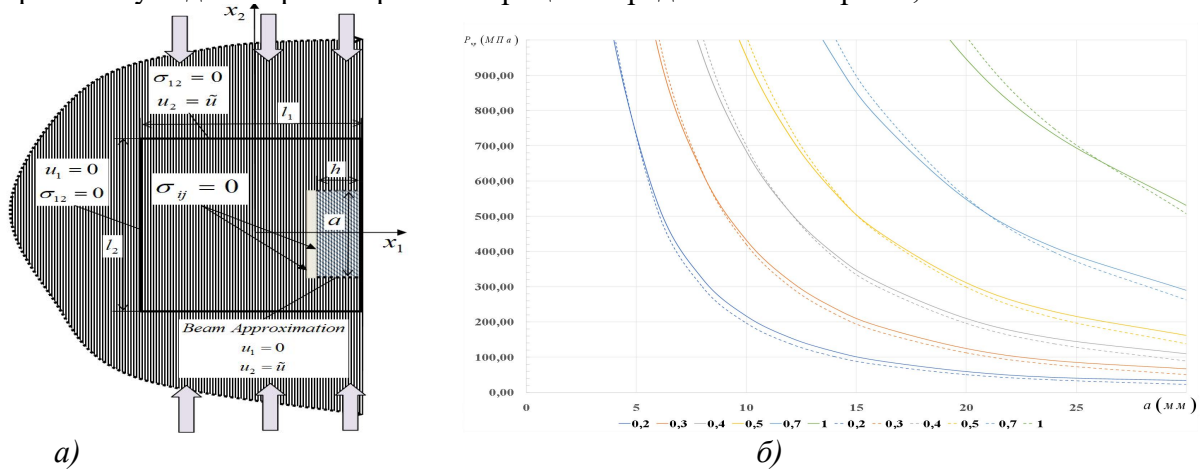
Згідно з дослідженнями О.М. Гузя, В.Л. Богданова та В.М. Назаренка [1], при стиску вздовж тріщини руйнування може бути ініційоване не класичним розкриттям (Mode I), а локальною втратою стійкості матеріалу, що оточує тріщину. Цей механізм є критично важливим для розуміння поведінки матеріалу, особливо коли навантаження діє паралельно площині тріщини. Найбільш точним підходом для дослідження цього механізму руйнування в композитах є тривимірна лінеаризована теорія стійкості деформованих тіл (ТЛТСДТ) [2].

Мета цієї роботи – дослідити механізм локальної втрати стійкості у односпрямованому склопластику, що зазнає стиску вздовж приповерхневої тріщини, розташованої паралельно напрямку армування, на основі рівнянь ТЛТСДТ, а також провести порівняльний аналіз з наближеним підходом (*Beam Approximation*). Результати дослідження дозволять глибше зрозуміти механіку руйнування композитів з приповерхневими дефектами та розробити ефективніші методи оцінки міцності та прогнозування довговічності критичних елементів конструкцій в аерокосмічній техніці.

Математична модель, яка застосована у роботі, відповідає точному підходу до розв'язання задач механіки композитів на основі застосування рівнянь теорії пружності і другого варіанту ТЛТСДТ в рамках моделі кусково-однорідного середовища. Задача розглядається для випадку плоскої деформації. Застосовується статичний метод дослідження задач ТЛТСДТ, при якому розв'язується узагальнена задача на власні значення. При підході *Beam Approximation* досліджується втрата стійкості пластини, яка відокремлюється тріщиною та вільною поверхнею матеріалу. На торцях пластини

застосовуються умови їх жорсткого защемлення із заданим переміщенням у напрямку стиску. Чисельний розв'язок задачі отримано методом сіток в рамках концепції базових різницевих схем [3]. Обчислювальні алгоритми та технологія проведення розрахунків, що застосовані у роботі, орієнтовані на використання паралельного алгоритмічно програмного забезпечення.

Розрахункова схема для дослідження локальної втрати стійкості у склопластику при стиску вздовж приповерхневої тріщини представлена на рис.1, а



а)
Рис. 1

Розглянуто склопластик з наступними пружними характеристиками:

$$E_1 = 53980 \text{ МПа}, \quad E_2 = E_3 = 9412 \text{ МПа}, \quad G_{12} = G_{13} = 5548 \text{ МПа}, \quad G_{23} = 3000 \text{ МПа},$$

$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0,33$. Довжина a приповерхневої тріщини змінювалась у межах $3 \div 30$ мм. Відстань h до вільної поверхні – у межах $0,2 \div 1$ мм. Відповідно до застосування підходу *Beam Approximation* a і h – це довжина і товщина пластини, яка відокремлена тріщиною і вільною поверхнею. Результати чисельного розв'язку представлені на рис.1, б. На графіку наведено залежність критичних навантажень $P_{кр}$, які відповідають локальній втраті стійкості матеріалу у околі приповерхневої тріщини, від значень a і h . Суцільні лінії відповідають точному підходу, штрихові – наближеному. При аналізі отриманих результатів застосовується параметр $\beta = h/a$. Аналіз отриманих даних дозволяє зробити наступні висновки.

1. Локальна втрата стійкості у склопластику при стиску вздовж приповерхневої тріщини є одним із ключових механізмів руйнування.
2. Критичне навантаження істотно залежить від безрозмірного параметра $\beta = h/a$: зі збільшенням довжини тріщини або її наближенням до поверхні (зменшення β) навантаження зменшується за асимптотичним законом.
3. Порівняння тривимірного підходу та моделі *Beam Approximation* показало високу узгодженість результатів (розбіжність не перевищує 1–2 %) у межах пружного діапазону до границі міцності склопластику (~1000 МПа).
4. Для малих β обидва підходи дають практично збіжні результати, тоді як при великих β тривимірний підхід забезпечує реалістичніші оцінки критичних навантажень.
5. Отримані залежності можуть бути використані для оцінювання несучої здатності елементів конструкцій із приповерхневими дефектами та вдосконалення критеріїв локальної стійкості у волокнистих композитах.

1. Guz A.N., Bogdanov V.L., Nazarenko V.M. Fracture of Materials Under Compression Along Cracks. – Advanced Structured Materials, Vol. 138. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 490 p.

2. *Guz A.N. Fundamentals of the Three-Dimensional Theory of Stability of Deformable Bodies.* Berlin: Springer-Verlag Heilberg, 1999. – 555p.

3. *Механика композитов:* В 12-и т. (Под общей ред. А.Н. Гузя). Т.11. *Григоренко Я.М., Шевченко Ю.В., Василенко А.Т. и др.* Численные методы. – Киев: «А.С.К.», 2002. – 448 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ РАКЕТНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ УТОЧНЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

**Б.Д. Дробенко¹, Д.В. Клименко², М.В. Марчук¹, В.М. Сіренко², В.М. Харченко²,
М.М. Хом'як¹**

¹*ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів*

²*ДП "КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля", м. Дніпро*

При проектуванні сучасних конструкцій 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.

Засобами математичного і комп'ютерного моделювання отримано експертну оцінку міцності та експлуатаційної надійності ракетних конструкцій складної форми і структури. Досліджено, зокрема, міцність габаритних паливних баків за навантаження, що відповідає умовам натурного руйнівного експерименту. За припущення, що переміщення й деформації можуть бути великими, а напруження – істотно перевищувати межу пластичності використуваних матеріалів, моделювання виконано в межах геометрично нелінійної теорії пружнопластичності із застосуванням методу скінченних елементів.

Проаналізовано динаміку зміни найнавантажених місць розглядуваних конструкцій 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 надають можливість оптимізувати просторову структуру розглядувані конструкції за геометричними параметрами. Варіюючи геометричні параметри, добираючи відповідні матеріали складових, можна отримувати конструкції з різними запасами міцності.

Розроблені засоби математичного й комп'ютерного моделювання надають можливість різко 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 такого експерименту 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. Зі збільшенням випадків збігу результатів комп'ютерного моделювання і натурних експериментів зі зростанням довіри до комп'ютерного моделювання взагалі відпадає необхідність у натурних експериментах, коли навантаження доводять до руйнівного.

ЩОДО ПИТАННЯ КЛАСИЧНОЇ МЕХАНІКИ ПРО РІВНОМІРНИЙ РУХ ТВЕРДОГО ТІЛА БЛЯ ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ

І.В. Добров

Національна металургійна академія України

Класична механіка як наука про рух будь-якого твердого тіла базується на трьох законах Ньютона, які встановлені при дослідженнях прямолінійного руху твердого тіла. Ці закони уявляють собою аксіоми теоретичної механіки [1]. В цьому випадку з першого закону Ньютона слідує закон інерції тіла, яке за відсутністю сил, прикладених до цього тіла, буде безстроково довго зберігати рівномірний прямолінійний рух, або спокій. Втім у роботі [2] показано, що процес рівномірного прямолінійного руху твердого тіла з позиції прикладної механіки, як самостійного розділу класичної механіки [3], забезпечується умовами дотримання першого і третього законів Ньютона одночасно з законом збереження механічної енергії при цьому процесі. Звідки слідує, що будь-яке тверде тіло зберігає рівномірний прямолінійний рух тоді та тому доки зовнішні сили не змінюють цей рух і при цьому має місце закон збереження механічної енергії при дії двох врівноважуючи одне одного зовнішніх сил руху та спротиву руху, коли їх рівнодіюча сила дорівнює нулю, але переміщення тіла буде тривати до тих пір доки джерело механічної енергії сили спротиву руху буде мати можливість накопичувати механічну енергію при роботі сили спротиву, а саме цю механічну енергію втрачає джерело енергії сили руху при роботі цієї сили. Своєю чергою тверде тіло зберігає стан спокою тоді та тому доки зовнішні сили прикладені до тіла діють у протилежних напрямках та врівноважують одне одного і їх рівнодіюча сила дорівнює нулю, але ці сили не здійснюють роботу щодо переміщення твердого тіла і джерела енергії кожної з зовнішніх сил не змінюють свою механічну енергію під час спокою твердого тіла, або врівноважені зовнішні сили мають лише одно джерело механічної енергії.

Виконані теоретичні дослідження кінематичних умов рівномірного обертального руху твердого тіла навколо нерухомої вертикальної осі з використанням векторного аналізу [4] дозволило встановити додатковий кінематичний параметр рівномірного обертального руху твердого тіла у вигляді тангенціального прискорення «div», спрямованого вздовж тангенціальної швидкості центра мас тіла, у напрямку кутової швидкості обертання центра мас тіла по колу. Модуль цього прискорення, який дорівнює подвоєному добутку рівномірної кутової швидкості обертання центра мас тіла по колу на тангенціальну швидкість обертання по колу центра мас, не змінює модуль тангенціальної швидкості центра мас. Динамічний аналіз цього процесу з урахуванням додатково отриманого кінематичного параметра «div» підтверджує результати дослідження умов рівномірного прямолінійного руху у роботі [2].

1. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики (часть первая). – Москва: Наука. Физматлит, 1979. – 468 с.
2. Dobrov I.V. Mechanics of uniform motion of a rigid body // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. P. 733–744.
3. Добров И.В. Развитие теоретических основ прикладной механики как раздела классической механики // Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. «Механіка машин – основна складова прикладної механіки». – (11 – 13 квітня 2017 р.), Дніпро. – С. 23 – 26.
4. Dobrov I.V. (2024). Vector analysis of uniform rotation of the rigid body around a fixed vertical axis. International Applied Mechanics, 60(6), 120–130. ISSN 0032-8243.

УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ КАПІТАЛЬНИХ ВИРОБОК ПРИ ЇХ ПРОВЕДЕННІ ПО ВИРОБЛЕНОМУ ПРОСТОРУ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЛАВИ

О.П. Круковський, С.А Курносов, Ю.Ю. Буліч, В.О. Хворостян

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

Проведення капітальних виробок по виробленому простору супроводжується складними геомеханічними процесами, що зумовлюють ризики втрати їх стійкості. У роботі виконано чисельне моделювання напруженого стану шаруватого породного масиву для оцінки стійкості чотирьох капітальних виробок, розташованих у виробленому просторі розвантажувальної лави, поза впливом та в зоні впливу очисних робіт. Моделювання здійснювалося в пружно-пластичній постановці методом скінчених елементів із використанням авторського програмного забезпечення, каліброваного за даними ПРАТ «ШУ Покровське» [1]. Розглянуто гірничо-геологічні умови блоку 11, глибина – 930–1230 м; кріплення капітальних виробок – комбіноване анкерно-рамне.

Встановлено, що варіювання відстані між виробками у межах 50–70 м не впливає на їх взаємний вплив. Основним чинником стійкості є розмір опорного цілика між діючою лавою та виробленим простором. За ширини цілика 120–140 м вплив очисних робіт на капітальні виробки мінімальний, тоді як при 80 м зона підвищеного гірського тиску досягає першої, а частково й другої виробки, що підвищує ризик деформацій покрівлі на 120–200 %. Анкерно-рамне кріплення забезпечує задовільну стійкість за умов дотримання мінімальної безпечної ширини цілика, рис. 1.

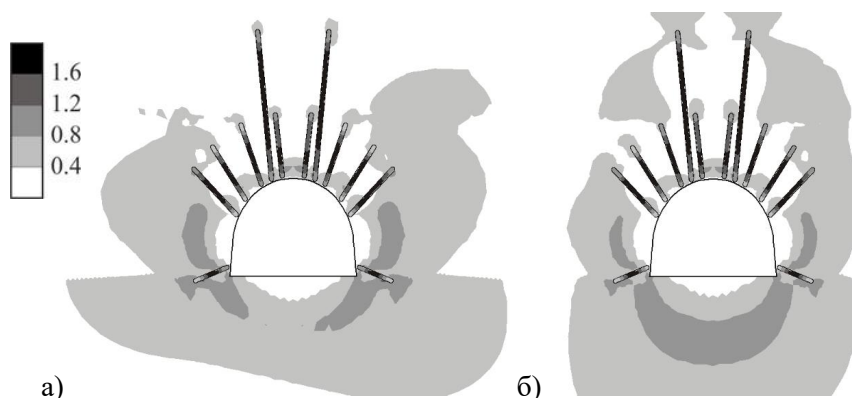


Рисунок 1 – Розподіл значень параметру $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$ навколо першої виробки, відстань між виробками – 60 м, $H = 930$ м: а) поза впливом очисних робіт; б) в зоні впливу очисних робіт, ширина цілика між діючою лавою та виробленим простором – 120 м.

Зі збільшенням глибини проведення виробок на 300 м межа впливу опорного тиску розширюється приблизно на 10–12 %, що вимагає посилення кріплення.

Отримані результати можуть бути використані для прогнозування геомеханічних ризиків і вибору безпечних параметрів проведення та кріплення капітальних виробок у виробленому просторі лав на великих глибинах [2].

Література

1. Krukovskyi O.P., Krukovska V.V., Kurnosov S.A., Yanzhula O.S., Bulich Yu.Yu. (2023), Study of permanent workings stability when they are driven through the gob of relieving longwall, *Geo-Technical Mechanics*, №165, P. 51-63. <https://doi.org/10.15407/geotm2023.165.051>
2. Krukovskyi O., Bulich Y., Kurnosov S., Yanzhula A., Dyomin V. (2022), Substantiating the parameters for selecting a pillar width to protect permanent mine workings at great depths, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970, 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012049>

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ ФАЗОВОГО ТА НАПРУЖЕНОГО СТАНІВ СТАЛЕВИХ ТІЛ ПРИ ТЕХНОЛОГІЧНОМУ НАГРІВАННІ У ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ

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

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

Багато виробничих процесів пов'язані з технологічним нагрівом (термообробка, зварювання, відпал тощо) сталевих конструкцій до високих температур, що утворює аустенітні зони. У результаті при подальшому охолодженні утворюються різні структурні складові. Дані процеси пов'язані з теплопровідністю для визначення температурного поля, матеріалознавством для визначення вмісту структурних складових та механікою деформованого твердого тіла для розрахунку залишкових напружень. Відсутня єдина відносно проста та достатньо точна методологія визначення фазового складу та залишкових напружень у тонких пластинах, виготовлених з низьковуглецевих, низьколегованих сталей під час високотемпературного нагріву нормально розподіленим рухомим джерелом тепла та додатковими технологічними умовами. Вибрано методологію, яку розроблено на основі відомої статистичної моделі для опису складових залишкових фазових та напружених станів у сталевих тілах під час монотонного охолодження з аустенітного стану.

Додаткові технологічні умови (значення початкової сталої температури (температури загального підігріву), локальне стаціонарне температурне поле підігріву, значення параметра розсіювання в джерелі і т.п.) впливають на розподіли залишкових фазових та напружених складових у сталевих тонких пластинах менш істотно, ніж додаткові рухомі розділені джерела тепла (з декількома центрами локалізації).

ПРО ДОСВІД ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУВАННЯ І ВЛАСНИХ ЧАСТОТ РАДІОПРОЗОРОГО ОБТІЧНИКА

В.А. Максимюк, Є.А. Сторожук

Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України

Понад два десятиліття тому в ІМех були виконані унікальні дослідження деформування і власних частот склопластикового тришарового радіопрозорого обтічника (рис. 1) під дією ударної хвилі [1]. Ударну хвилю з крутим фронтом наростання тиску біля 40 мкс та постійним понад атмосферним тиском до 100 кПа поза фронтом тривалістю біля 8 мс формувала ударна труба. Поздовжні й колові деформації реєструвались п'єзодатчиками власної конструкції на двох швидкодіючих цифрових 2-канальних осцилографів GDS-806S (Тайвань).

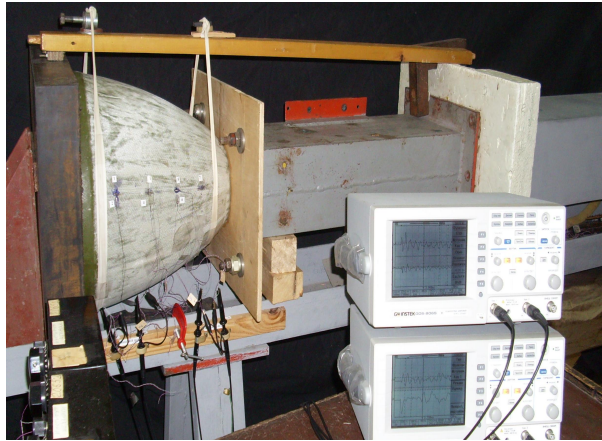


Рис. 1 Осцилографи, ударна труба, обтічник

У 2010 році в ІМех був створений Центр колективного користування приладами «Аналізатор динамічних процесів» на основі портативного 8-канального реєстратора (рис. 2) вібраційних, акустичних і тензосигналів LMS SCADAS Mobile (Бельгія). Універсальний реєстратор служить для вимірювання й аналізу сигналів квазістатичних та динамічних процесів. Він є сумісним практично з будь-яким типом датчиків: тензорезисторами, акселерометрами, мікрофонами та ін.

В подальшому ударна труба модернізувалася промисловим, порівняно недорогим, датчиком (рис. 3) динамічного тиску WKA A-10 (Німеччина) з нерегламентованими частотними характеристиками. Проте нам вдалося підключити датчик до «вольтового» входу реєстратора, встановити його часові характеристики та вимірювати тиск в ударній трубі безпосередньо.



Рис. 2. Реєстратор LMS SCADAS Mobile



Рис. 3. Датчик WKA A-10

Таким чином, наявне устаткування дозволяє досліджувати динамічні механічні явища спеціальної техніки за дії ударних хвиль з крутим фронтом. Воно може бути використане для підвищення кваліфікації викладачів і для стажування й практики студентів і аспірантів навчальних закладів механічного профілю.

1. Lugovoj, P. Z., Mikhajlova, M. I., Meish, V. F., Malashenkov, S. P., Anik'ev, I. I., & Sushchenko, E. A. (2003). Interaction of Complex Objects with Shock Waves. *Strength of Materials*, 35(6), 581–587.

СИСТЕМА МІЖФАЗНИХ ТРІЩИН В ОДНОВИМІРНОМУ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОМУ КВАЗІКРИСТАЛІ

Комаров О.В., Шевельова А.Є., Гергель І.Ю., Лобода В.В.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна

Незважаючи на наявність низки публікацій стосовно тріщин в п'єзоелектричних квазікристалах, зокрема [1-3], система електропровідних колінеарних тріщин вздовж межі розділу двох зв'язаних одновимірних п'єзоелектричних квазікристалічних півпросторів раніше не розглядалась. Якраз ця проблема вивчається у даній роботі. Вважається, що напрям поляризації складових матеріалів і квазіперіодичного розташування атомів співнаправлений з напрямом фронту тріщини і ортогональний до площини з періодичним розташуванням атомів. Рівномірно розподілене фононне та фазонне зсувне навантаження діє на віддаленні від тріщини, електричне поле діє в перпендикулярній фронті тріщини площині.

Фононні та фазонні напруження, компоненти електричного поля, вектора стрибка похідних фононного, фазонного та електричного зміщення виражено в матрично-векторний спосіб через векторну функцію яка є голоморфною у всій комплексній площині, за винятком області тріщини. Використовуючи ці представлення, сформульовано незв'язану систему задач лінійного спряження з відповідними умовами на нескінченності. Розв'язок цих задач побудовано в аналітичній формі, отримано представлення для відповідних кусково-голоморфних функцій. Через знайдені функції виражені фононні та фазонні напруження, що діють на відрізках між тріщинами, а також стрибки переміщень на берегах тріщин. Встановлено, що отримані розв'язки мають осцилюючу кореневу сингулярність на вершинах кожної тріщини.

Чисельний аналіз проведено для гетерогенного квазікристалічного з'єднання за наявності трьох тріщин вздовж межі розділу матеріалів. Графічно проілюстровано залежність фононного розкриття тріщин від їх взаємного розташування на прикладі системи з трьох тріщин. Показано, що напруження на відрізках інтерфейсу між тріщинами суттєво зростають при згущенні взаємного розташування тріщин. Залежності для фазонного розкриття тріщин для системи трьох тріщин при зміні взаємних відстаней є подібним до фононного при відмінності форми розкриття тріщин. Знайдено швидкість вивільнення енергії, на основі якої можна визначити можливість розвитку тріщини. Спостерігається збільшення швидкості вивільнення енергії зі зменшенням відстані між тріщинами.

1. Loboda V., Komarov O., Bilyi D., Lapusta Y. An analytical approach to the analysis of an electrically permeable interface crack in a 1D piezoelectric quasicrystal. *Acta Mechanica* 2020, 231 (8), 3419-3433. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02721-8>
2. Hu K. Q., Jin H., Yang Z., Chen X. Interface crack between dissimilar one-dimensional hexagonal quasicrystals with piezoelectric effect. *Acta Mech.* 2019, 230, 2455–2474. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-02404-z>
3. Hu K. Q., Gao C.-F., Zhong Z., Chen Z. T. Interaction of collinear interface cracks between dissimilar one-dimensional hexagonal piezoelectric quasicrystals. *Z Angew. Math. Mech.* 2021, 101, e202000360. <https://doi.org/10.1002/zamm.202000360>

ПРО ВПЛИВ ВКЛЮЧЕННЯ ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНОГО МАТЕРІАЛУ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ У ТОНКІЙ ПЛАСТИНІ З КРУГОВИМ ОТВОРОМ ЗА РІЗНИХ ГРАНИЧНИХ УМОВ

Е. Л. Гарт¹, Б. І. Терьохін²

¹*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна*

²*Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, Україна*

Функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ) – це вдосконалені композитні матеріали з поступовою зміною мікроструктури та/або складу. Завдяки особливостям цих матеріалів їх все частіше використовують на практиці в різних галузях техніки, зокрема ракетно-космічній, нафтогазовій, енергетиці, будівництві тощо. Зазвичай ФГМ виготовляють за допомогою поєднання декількох матеріалів в різних пропорціях задля отримання необхідного градієнта властивостей.

У випадку використання пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з отворами важливим є питання зниження концентрації напружень, яка виникає поблизу отворів [3]. Застосування ФГМ дає змогу впливати на розподіл напружень та деформацій у тонкостінних конструкціях [1, 2].

У цій роботі проведено комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) тонкої ізотропної прямокутної пластини розмірами $a \times b$ з центрально розташованим круговим радіусу R та радіально-неоднорідним включенням радіусу R_1 з урахуванням різних граничних умов (одновісний розтяг, двовісний розтяг, чистий зсув), що не призводять до появи пластичних деформацій. Вважалося, що включення змодельовано вставкою, яка розташована у площині пластини і має однакову з нею товщину; на міжфазній поверхні задано умови ідеального механічного контакту.

Результати комп'ютерного моделювання і числового дослідження впливу геометричних і механічних характеристик ФГМ-включення на концентрацію параметрів НДС навколо отвору в тонких пластинах показали, що за наявності ФГМ-включень з певними механічними властивостями та геометричними характеристиками вдається суттєво зменшити коефіцієнт концентрації напружень (ККН) і відповідну інтенсивність деформацій в околі отвору для всіх розглянутих варіантів граничних умов. Показано, що для кожного варіанта граничних умов раціональні параметри ФГМ-включень різні, але запропонований закон зміни модуля пружності радіально-неоднорідних включень дозволяє зменшити концентрацію напружень і максимальну інтенсивність деформацій в усіх розглянутих випадках.

Отже, використання кільцевих ФГМ-включень з певними раціональними параметрами навколо кругових отворів у пластинах за наявності різних граничних умов є доцільним, оскільки такі включення дають змогу знизити концентрацію напружень, сприяючи їх плавному перерозподілу, не викликаючи стрибків на межі розділу фаз.

1. *Hart E. L., Terokhin B. I.* Effect of functionally graded inclusion on stress conservation near a circular hole in thin plates for different boundary conditions // Journal of Optimization, Differential Equations and their Applications. – 2025. – Vol. 33, No. 1. – P. 110–127. <https://doi.org/10.15421/142506>

2. *Hudramovich V. S., Hart E. L., Terokhin B. I.* 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. – Vol. 204. – Chapter 18. – P. 249–264. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54063-9_18

3. *Pilkey W. D., Pilkey D. F., Bi Z.* Peterson's Stress Concentration Factors. 4th Edition. – Wiley, 2020. – 640 p.

ПРОБЛЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРАХУНКІВ КРИТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАКЕТ-НОСІВ БЕЗ РУЙНУЮЧИХ ВИПРОБУВАНЬ

А. П. Дзюба^{1,2}, В. М. Сіренко²

¹*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара*

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

Процес проектування і створення несучих конструкцій нової техніки неминуче пов'язаний з необхідністю розробки адекватних розрахункових схем, достовірних математичних моделей, ефективних алгоритмів комп'ютерного моделювання та сучасних засобів числового аналізу. У той же час, незважаючи на жорсткі вимоги до якості виконання проектно-розрахункових робіт, на завершальній стадії створення конструкції забезпечення достовірності розрахункових характеристик часто здійснюється шляхом проведення експериментальних натурних випробувань створюваних виробів. Проведення таких (як правило, руйнуючих і часто неодноразових) випробувань суттєво підвищує вартість розробки нових складних конструкцій машинобудування. При цьому витрати на проведення руйнуючих випробувань виявляються особливо відчутними для випадку розробки і створення несерійних (разових) виробів.

Зазначена проблема обумовлена існуючою наявністю певної розбіжності результатів розрахунку, неруйнівного контролю та руйнівних випробувань. Можливості збільшення міцнісної надійності таких конструкцій шляхом завищення коефіцієнту запасу міцності обмежені у зв'язку з погіршенням вагових показників виробів, оскільки такий підхід знижує їх конкурентоспроможність на ринку ракетно-космічних послуг.

Подане дослідження направлене на побудову більш достовірного підходу до прогнозування несучої здатності неоднорідних оболонкових конструкцій сучасного машинобудування, зокрема, елементів ракетно-космічної техніки, баків, сухих відсіків ракет-носіїв з метою відмови від проведення або зменшення обсягу високовартісних руйнівних випробувань

Суть запропонованого підходу полягає в системному визначенні діапазону можливих відхилень основних розрахункових характеристик поведінки натурального об'єкта в залежності від відхилень вхідних даних від своїх номінальних значень. З цією метою використовуються елементи теорії чутливості. Це дозволяє визначити вплив широкого кола параметрів конструкції, зокрема, відхилень геометричних розмірів, значень фізико-механічних характеристик, величин зовнішніх навантажень та інших технологічних неточностей виготовлення, а також здійснювати оцінку достовірності розрахункових показників, викликаних введенням спрощують гіпотез і припущень, вибором розрахункової схеми, математичної моделі, помилок, пов'язаних з використанням засобів скінченно-елементного аналізу, відхиленнями вхідних даних від реально існуючих параметрів конструкції на критичні параметри міцності та надійності реального об'єкта дослідження. Методика ґрунтується також на даних порівняльного аналізу результатів розрахунку та даних паралельного неруйнівного в пружній області деформування випробування реального об'єкта та ін.

Приведені приклади задач, що демонструють небажаний вплив відхилень зазначених параметрів на результати розрахунку.

Результати досліджень можуть бути використані для внесення коректив в проектні і розрахункові дані та обґрунтування достовірності результатів числового аналізу без проведення руйнуючих випробувань складних конструкцій машинобудування.



Доповіді секцій: *Механіка деформівного твердого тіла та механіка рідини, газу та плазми (13 листопада 2025)*

Секційні доповіді (12³⁰-17³⁰)

1(2). М.О. Бабешко, В.Г. Савченко ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ШАРУВАТИХ ТІЛ ТА ОБОЛОНОК З УРАХУВАННЯМ УСКЛАДНЕНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ	26
2(35) Yu.Yu.Abrosov THE METHODS OF CALCULATION OF LONG THIN CYLINDRICAL SHELL WITH SUPERCIRCULAR CROSS SECTION	27
3(20) П.О. Стебляк МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ДЕЯКИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ	28
4(3). М. Ф. Мормуль, О. М. Щитов, Д. М. Щитов БАГАТОЦІЛЬОВА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕБРИСТИХ КОМПОЗИТНИХ ПАНЕЛЕЙ	29
5(7). О.С. Кучеренко, В.А. Блажко СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНА МОДЕЛЬ КОНТАКТУ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ОБОЛОНКОВОЇ СТРУКТУРИ З ЛОЖЕМЕНТОМ	33
6(9). О.П. Круковський, В.В. Круковська ГІДРОМЕХАНІЧНІ РИЗИКИ, ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ ЗАТРИМКОЮ ВСТАНОВЛЕННЯ КРІПЛЕННЯ ПРИ ПРОХОДЦІ ТУНЕЛІВ В ТРИЩИНУВАТИХ ПОРОДАХ	34
7(10). В.В. Круковська, А.О. Костриця ВПЛИВ ЛІТОЛОГІЧНОГО СКЛАДУ НА РОЗВАНТАЖЕННЯ ПОРІД ПІДОШВИ ОЧИСНОЇ ВИРОБКИ З МЕХАНІЗОВАНИМ КРІПЛЕННЯМ	35
8(11). D.O. Krukovskyi TWO-DIMENSIONAL BLAST-WAVE SIMULATION IN AN IDEAL GAS VIA FEM	36
9(17). Г.І. Щурук ЧАСТОТНІ СПЕКТРИ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ В ОБОЛОНЦІ З В'ЯЗКОЮ РІДИНОЮ ПРИ ДВОХ ТЕОРІЯХ ОБОЛОНОК	37
10(47). Ю.О. Виноградов ВПЛИВ АГРЕСИВНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА МЕТАЛЕВЕ КРІПЛЕННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК	38
11(18). Є.М. Ірза НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНОГО ТІЛА ЗА ДІЇ ЗМІННОГО ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ	40
12(19). О.М. Багно ВПЛИВ СКІНЧЕНИХ ПОЧАТКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ПОВЕРХНЕВУ СТІЙКІСТЬ НЕСТИСЛИВОГО ПРУЖНОГО ШАРУ, ЩО ВЗАЄМОДІЄ З ПІВПРОСТОРОМ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ	41
13(23). М. Хом'як, Н. Лопух ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ	42
14(28). А. Ю. Глухов ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ КРУЧЕННЯ В ШАРУВАТИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛАХ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ ПРИ УМОВАХ ПОВНОГО ПРОКОВЗУВАННЯ ШАРІВ	43

15(29). Ю. П. Глухов РЕГУЛЯЦІЙНО-СПЕКТРАЛЬНИЙ МЕТОД ЗІ СТРУКТУРНОЮ РЕГУЛЯРИЗАЦІЄЮ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ШАРУВАТИХ КОНСТРУКЦІЙ	44
16(38). В.М. Бистров, В.А. Декрет, В.С. Зеленський, О.А. Проценко ЛОКАЛЬНА ВТРАТА СТІЙКОСТІ ПРИ СТИСКУ ВОЛОКНИСТО-МЕТАЛЕВОГО ЛАМІНАТУ ІЗ ПРИПОВЕРХНЕВИМ РОЗШАРУВАННЯМ	45
17(39). В.І.Козлов, Л.П.Зінчук, Ю.І.Лелюх ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ ТА ДИСИПАТИВНИЙ РОЗІГРІВ ПРОСТОРОВОЇ ШАРУВАТОЇ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОЇ В'ЯЗКОПРУЖНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПАНЕЛІ З ЗАЛЕЖНИМИ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	47
18(34) М.О. Babeshko, V.G. Savchenko ALGORITHM FOR NUMERICAL STUDY OF THE AXISYMMETRIC ELASTOPLASTIC STATE OF THIN SHELLS MADE OF FUNCTIONALLY-GRADIENT MATERIALS	49
19(41). E. L. Hart, O. D. Shebanov NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE NUMBER AND ARRANGEMENT OF ELLIPTICAL INCLUSIONS ON STRESS CONCENTRATION IN A CYLINDRICAL SHELL WITH A CIRCULAR HOLE	49
20(44). Карнаухов В.Г., Лелюх Ю.І., Козлов В.І., Зінчук Л.П. КЕРУВАННЯ АМПЛІТУДОЮ ВИМУШЕНИХ КОЛИВАНЬ ТРИШАРОВОЇ В'ЯЗКОЕЛЕКТРОПРУЖНОЇ КОНІЧНОЇ ПАНЕЛІ В РЕЖИМІ П'ЄЗОАКТУАТОРА	50
21(50). K. Panin, O. Koliada SOLUTION OF TWO-DIMENSIONAL BOUNDARY-VALUE PROBLEMS IN PLASTICITY THEORY UNDER ARBITRARY COMPLEX LOADING	52
22(53). С.О. Чернецький, Є.О. Коваленко АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІСТОРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРУЖНОПЛАСТИЧНУ ПОВЕДІНКУ КОНТАКТНОЇ ПОВЕРХНІ ДВОШАРОВОГО ТІЛА	53
23(54). С.М. Склепус ВИЗНАЧАЛЬНІ СПІВВІДНОШЕННЯ ПОВЗУЧОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНО- ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ	55
24(55). В.О. Боднар, В.С. Пакош, В.В. Бабуров АНАЛІЗ РОЗРАХУНКОВИХ ВЕЛИЧИН ФЛАТЕРА ПОДАТЛИВИХ ДО ТРАНСВЕРСАЛЬНОГО ЗСУВУ ПЛАСТИН-СМУГ ЗА РІЗНИХ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ	56

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ШАРУВАТИХ ТІЛ ТА ОБОЛОНОК З УРАХУВАННЯМ УСКЛАДНЕНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ

М.О. Бабешко, В.Г. Савченко
Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ

Пропонуються розроблені математичні моделі для дослідження осесиметричного термопружнопластичного напружено-деформованого стану складених тіл та оболонок, в яких поєднуються ізотропні та ортотропні матеріали. Вважається, що в процесах термосилового навантаження ізотропні матеріали деформуються як в межах, так і за межами пружності, а ортотропні матеріали деформуються пружно.

Враховуються залежність деформаційних характеристик ізотропних матеріалів від температури, виду напруженого стану та історії деформування. Використовуються визначальні рівняння [1, 2], що описують деформування матеріалів вздовж траєкторій малої кривизни. Визначальні рівняння містять дві нелінійні залежності, одна з яких пов'язує перші інваріанти тензорів напружень та деформацій, а інша – другі інваріанти відповідних девіаторів. Вказані нелінійні залежності конкретизуються за результатами

експериментів на пропорційне навантаження трубчастих зразків при різних значеннях температури і параметра виду напруженого стану. За параметр виду напруженого стану прийнято кут подібності девіаторів, який визначається через другий та третій інваріанти девіатора напружень.

Ортотропні матеріали, головні напрямки анізотропії яких збігаються з напрямками системи координат, можуть мати різні властивості при розтязі та стиску. Для опису деформування ортотропних матеріалів використано співвідношення [3] теорії різномодульної пружності.

Сформульовано визначальні рівняння в формі, єдиній для ізотропних і ортотропних матеріалів. Запропоновано спосіб лінеаризації визначальних рівнянь. Для розв'язання просторової задачі використовується метод скінченних елементів. Для розв'язання задачі теорії оболонок використовуються гіпотези Кірхгофа - Лява для пакету шарів. Одержано системи розв'язувальних рівнянь для просторових тіл та оболонок обертання. Описано методику побудови послідовних наближень при поетапному визначенні пружнопластичного стану тіл в процесах термосилового навантаження.

Одержано числові результати. Проаналізовано вплив на результати розрахунків врахування залежності властивостей ізотропного матеріалу від виду напруженого стану, пластичного розпушення та температури, а також різномодульності ортотропних матеріалів. Встановлено, що врахування названих проявів залежності властивостей матеріалів від виду навантаження може суттєво вплинути на прогнозування руйнівного навантаження тіл, що моделюють поведінку відповідальних елементів конструкцій в процесі експлуатації.

1. *Shevchenko Yu.N., Terekhov R.G., Tormakhov N.N.* Constitutive Equations for Describing the Elastoplastic Deformation of Elements of a Body along Small-Curvature Paths in View of the Stress Mode // *Int. Appl. Mech.* – 2006. – **42**, N 4. – P. 421 – 430.
2. *Shevchenko Yu.N., Terekhov R.G., Tormakhov N.N.* Elastoplastic Deformation of Elements of an Isotropic Solid along Paths of Small Curvature: Constitutive Equations Incorporating the Stress Mode // *Int. Appl. Mech.* - 2007. – **43**, N 6. – P. 621 – 630.
3. *Jones R.M.* Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and Compression // *AIAA J.* – 1977. – **15**, N1. – P.16 – 23.

THE METHODS OF CALCULATION OF LONG THIN CYLINDRICAL SHELL WITH SUPERCIRCULAR CROSS SECTION

Yu.Yu.Abrosov

S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences

Some numerical methods for calculating a long thin cylindrical shell under internal pressure are considered. One of them is the variational-difference method (VDM), the other is the finite-element one (FEM). Both methods gave a good result for the case of small curvature of the supercircle (case of circle). It agreed well with the analytical solution for this case. At higher curvature the methods gave some discrepancy in the results. It is connected with taking into account the shift in the FEM. A further increase in the curvature of the supercircle made it impossible to use first the VDM and then the FEM. Therefore, this curvature should be taken as optimal for the correct calculation of the shell for the strength analysis.

МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ДЕЯКИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ

П.О. Стеблянко

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

Запропоновано та обґрунтовано узагальнення визначальних співвідношень нелінійного деформування (нелінійна пружність, пластичність) для функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ), матеріалів з ефектом пам'яті форми та традиційних композитних матеріалів зернистої та волокнистої структури.

Для коефіцієнтів визначальних співвідношень, що описують залежність характеристик ФГМ від виду навантаження при деформуванні за межами пружності, і проведено верифікацію параметрів матеріалу на базі відомих експериментальних даних для функціональних матеріалів. Для запису визначальних рівнянь тензор деформацій представляється у вигляді суми тензорів пружної і пластичної деформації.

Фізичні рівняння при розв'язанні задач термопластичності оболонок вводимо так

$$\sigma_{ij} = a_{ijkl}\varepsilon_{ij} + b_{ij},$$

де a_{ijkl} - const в пружному випадку або залежать від параметрів процесу попереднього термопластичного деформування, які для ФГМ та функціональних матеріалів відомим чином може залежати від матеріальних координат тіла і часу.

Для метало-керамічних ФГМ фізико-механічні властивості матеріалу є функціями від об'ємної частки складових матеріалів і можуть бути виражені як

$$P = P_m V_m + P_c V_c, \quad V_m + V_c = 1,$$

де V_m, V_c - об'ємні частки кераміки ⁽¹⁾ та металу ⁽²⁾. Тоді

$$a_{ijkl}(x, y, z) = a_{ijkl}^{(1)} V_c(x, y, z) + a_{ijkl}^{(2)} V_m(x, y, z);$$

$$b_{ij}(x, y, z) = b_{ij}^{(1)} V_c(x, y, z) + b_{ij}^{(2)} V_m(x, y, z).$$

Для оболонок з ФГМ маємо наступні рівняння відносно переміщень середньої поверхні

$$a_{1111} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_{1122} \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + a_{1112} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial a_{1111}}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial a_{1122}}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial a_{1112}}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) + h \frac{\partial b_{11}}{\partial x} +$$

$$a_{1211} \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} + a_{1222} \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + a_{1212} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial a_{1211}}{\partial y} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial a_{1222}}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial a_{1212}}{\partial y} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) + h \frac{\partial b_{12}}{\partial y} + \rho C_1 = 0,$$

$$a_{1211} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_{1222} \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + a_{1212} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial a_{1211}}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial a_{1222}}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial a_{1212}}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) + h \frac{\partial b_{12}}{\partial x}$$

$$a_{2211} \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} + a_{2222} \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + a_{2212} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial a_{2211}}{\partial y} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial a_{2222}}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial a_{2212}}{\partial y} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) + h \frac{\partial b_{22}}{\partial y} + \rho C_2 = 0,$$

У випадку лінійної інтерполяції зміни складових ФГМ по одній з координат маємо

$$\begin{aligned}
V_1(L_1) &= 1; V_1(L_2) = 0; V_2(L_1) = 0; V_2(L_2) = 1; \\
V_1(x, y, z) &= \frac{x - L_2}{L_1 - L_2}; \frac{\partial V_1(x, y, z)}{\partial x} = \frac{1}{L_1 - L_2}; \\
V_2(x, y, z) &= -\frac{x - L_1}{L_1 - L_2}; \frac{\partial V_2(x, y, z)}{\partial x} = -\frac{1}{L_1 - L_2}; \\
a_{ijkl} &= \frac{1}{L_1 - L_2} [a_{ijkl}^{(1)}(x - L_2) - a_{ijkl}^{(2)}(x - L_1)]; \\
\frac{\partial a_{ijkl}}{\partial x} &= \frac{1}{L_1 - L_2} (a_{ijkl}^{(1)} - a_{ijkl}^{(2)}); \frac{\partial b_{ij}}{\partial x} = \frac{1}{L_1 - L_2} (b_{ij}^{(1)} - b_{ij}^{(2)}).
\end{aligned}$$

Для кубічних інтерполяції зміни складових ФГМ по одній з координат отримано

$$V_1 = a(x - L_1)^3 + b(x - L_1)^2 + c(x - L_1) + d; \quad d = 1; c = 0; b = -\frac{3}{(L_2 - L_1)^2}; a = \frac{2}{(L_2 - L_1)^3};$$

$$V_1(x, y, z) = 2 \frac{x - L_1}{L_2 - L_1}^3 - 3 \frac{x - L_1}{L_2 - L_1}^2 + 1; V_1(L_1) = 1; V_1(L_2) = 0;$$

$$V_2(x, y, z) = \frac{x - L_1}{L_2 - L_1}^2 - 3 - 2 \frac{x - L_1}{L_2 - L_1}; \quad V_2(L_1) = 0; V_2(L_2) = 1;$$

$$a_{ijkl} = 2 \frac{x - L_1}{L_2 - L_1}^3 - 3 \frac{x - L_1}{L_2 - L_1}^2 + 1 a_{ijkl}^{(1)} + \frac{x - L_1}{L_2 - L_1}^2 - 3 - 2 \frac{x - L_1}{L_2 - L_1} a_{ijkl}^{(2)};$$

$$b_{ij} = 2 \frac{x - L_1}{L_2 - L_1}^3 - 3 \frac{x - L_1}{L_2 - L_1}^2 + 1 b_{ij}^{(1)} + \frac{x - L_1}{L_2 - L_1}^2 - 3 - 2 \frac{x - L_1}{L_2 - L_1} b_{ij}^{(2)};$$

$$\frac{\partial a_{ijkl}}{\partial x} = \frac{6(x - L_1)(x - L_2)}{(L_2 - L_1)^3} (a_{ijkl}^{(1)} - a_{ijkl}^{(2)}); \frac{\partial b_{ij}}{\partial x} = \frac{6(x - L_1)(x - L_2)}{(L_2 - L_1)^3} (b_{ij}^{(1)} - b_{ij}^{(2)});$$

Таким чином, узагальнено визначальні співвідношення, що описують залежність характеристик матеріалу від виду навантаження при деформуванні за межами пружності, і проведено верифікацію параметрів матеріалу на базі відомих експериментальних даних для функціональних матеріалів.

Розроблено метод розв'язання стаціонарних задач деформування тіл обертання із матеріалів з ефектом пам'яті форми на основі застосування сплайн-функцій для підвищення точності.

БАГАТОЦІЛЬОВА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕБРИСТИХ КОМПОЗИТНИХ ПАНЕЛЕЙ

М. Ф. Мормуль, О. М. Щитов, Д. М. Щитов

Університет митної справи та фінансів

У сучасному авіаційному, машинобудівному та космічному виробництві важливим напрямом є вдосконалення конструкцій літальних апаратів (ЛА) із використанням композитних матеріалів, що знижують масу, витрати палива та навантаження на двигуни.

Розглянуто векторну модель оптимального проєктування вуглепластикової квадратної ортотропної панелі, шарнірно опертої по контуру та підкріпленої симетрично розташованими ребрами з того самого матеріалу. Панель перебуває під дією нормальних q_σ і дотичних q_τ напруг інтенсивності. Усі шари розташовані рівномірно по товщині і симетрично щодо серединної поверхні. Передбачається безмоментний докритичний стан обшивки. Аналіз проводиться в межах класичної теорії Кірхгофа–Лява для розрахунку обшивки та теорії Кірхгофа–Клебша для розрахунку ребер жорсткості. Розглядаються два типи ребер: а) у вигляді смуг з прямокутним поперечним перерізом; б) з поперечним перерізом у формі рівнобокого кута. Критеріями оптимізації обрано мінімізацію маси та вартості, що забезпечує підвищення ефективності, довговічності та економічності конструкцій ЛА.

Векторна задача оптимального проєктування полягає у визначенні параметрів панелі, за яких досягається оптимальне співвідношення маси та вартості конструкції при заданих обмеженнях D . Задача має вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{X}^* &= F^{-1} \underset{\bar{X} \in D}{opt} \{G(\bar{X}), C(\bar{X})\}; \\ G(\bar{X}) &\rightarrow \underset{\bar{X} \in D}{min}; \quad C(\bar{X}) \rightarrow \underset{\bar{X} \in D}{min}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\bar{X} = \{h, b, \delta, k, \theta_1, \dots, \theta_{N-1}, \mu, \beta_1, \dots, \beta_N\},$$

де $G(\bar{X})$ – маса конструкції, $C(\bar{X})$ – вартість конструкції; \bar{X} – вектор змінних параметрів (що включає: товщину панелі h ; при використанні в якості підкріплюючого набору полос прямокутного поперечного перерізу – висоту полоси δ і її товщину b , а при використанні в якості стрингерів ребер з поперечним перерізом форми рівнобокого кутка – висоту полки (стінки) δ ; товщину ребра b ; кількість стрингерів k ; відносні частоти елементарних шарів, розташованих під кутами $\pm \beta_k$ відносно твірної θ_k ($k = \overline{1, N}$); кути армування шарів β_k ($k = \overline{1, N}$). Для двох випадків підкріплення:

$$\begin{aligned} G(\bar{X}) &= (a^2 h + akb\delta) [\mu\gamma_a + (1-\mu)\gamma_c]; \quad C(\bar{X}) = (a^2 h + akb\delta) [\mu\gamma_a c_a + (1-\mu)\gamma_c c_c]; \\ &(2) \\ G(\bar{X}) &= [a^2 h + ak(2b\delta - b^2)] [\mu\gamma_a + (1-\mu)\gamma_c]; \quad C(\bar{X}) = [a^2 h + ak(2b\delta - b^2)] [\mu\gamma_a c_a + (1-\mu)\gamma_c c_c] \end{aligned} \quad (2a)$$

В оптимізаційній моделі (1) критеріями якості (2), (2a) є маса і вартість панелі, в якій враховується тільки вартість матеріалу. Вектор варіюваних параметрів \bar{X} . Область допустимих проектних розв'язків D описується як

$$D = \{\bar{X} \mid \bar{\varphi}(\bar{X}) \quad \bar{k}(\bar{X}) \quad \bar{\psi}(\bar{X})\},$$

де геометричні та структурні обмеження такі:

$$h^- \leq h \leq h^+; b^- \leq b \leq b^+; \delta^- \leq \delta \leq \delta^+; k^- \leq k \leq k^+; \mu^- \leq \mu \leq \mu^+; 0 \leq \theta_k \leq 1; \prod_{k=1}^N \theta_k = 1; 0 \leq \beta_k \leq \frac{\pi}{2} \quad (k = \overline{1, N}), \quad (3)$$

де вище наведено нижні та верхні межі змінення: h^- , h^+ – товщини панелі, b^- , b^+ – товщини стрингерів, δ^- , δ^+ – висоти стрингерів, k^- , k^+ – кількості стрингерів, μ^- , μ^+ – об'ємні коефіцієнти армування; \bar{X}^* – вектор конструктивних параметрів панелі; N – кількість напрямків армування; a – довжина панелі; γ_a, γ_c – густина арматури і сполучного; c_a, c_c – питома вартість арматури і сполучного.

При спільній дії напруг на композитну панель, що викликають нормальні та зсувні напруги, фізичними є обмеження: а) на місцеву стійкість обшивки, б) на стійкість елементів ребер при стиску, в) на загальну стійкість панелі, підкріпленої ребрами.

Місцева стійкість обшивки панелі. На основі [2] знаходимо критичну напругу при стиску вздовж q_{xk} і впоперек q_{yk} стрингерів і критичну напругу при зсуві $q_{\tau k}$:

$$q_{xk} = \frac{2\pi^2}{t^2} (\sqrt{D_{11}D_{22}} + D_3); \quad q_{yk} = \frac{\pi^2 D_{22}}{t^2};$$

$$q_{\tau k} = \frac{2\pi^2 D_{22}}{t^2} \sqrt{4 + 3 \frac{\sqrt{\alpha_1}}{\alpha_0} + \frac{\alpha_0}{\sqrt{\alpha_1}} \sqrt{\alpha_0}},$$

(4)

де $\alpha_0 = \frac{D_3}{D_{22}}; \alpha_1 = \frac{D_{11}}{D_{22}}; t = \frac{a}{k}$ – крок ребер; $D_{11} = \frac{E_1 h^3}{12(1-\nu_{12}^2)}; D_{22} = \frac{E_2 h^3}{12(1-\nu_{21}^2)}; D_3 = \frac{G_{12} h^3}{12},$

де D_{11}, D_{22} – погонні згинальні жорсткості непідкріпленої панелі у поздовжньому та поперечному напрямках; D_3 – циліндрична жорсткість; E_1, E_2 – модулі пружності вздовж і впоперек волокон армування; G_{12} – модуль зсуву у площині шару; ν_{12}, ν_{21} – коефіцієнти Пуассона. Обмеження по місцевій втраті стійкості обшивки панелі мають вигляд:

$$\psi_1(\bar{X}) = q_{xk} - q_{\sigma} = 0; \quad \psi_2(\bar{X}) = q_{yk} - q_{\sigma} = 0; \quad \psi_3(\bar{X}) = q_{\tau k} - q_{\tau} = 0.$$

(5)

Стійкість елементів підкріплюючого набору при стиску. Для відкритих елементів ребер прийнято обмеження

$$\psi_4(\bar{X}) = 10 - \frac{\delta}{b} = 0.$$

(6)

Стійкість підкріпленої панелі. Критичні напруги при стиску вздовж стрингерів \bar{q}_{xk} і зсуву $\bar{q}_{\tau k}$ запишемо, згідно з [4], як

$$\bar{q}_{xk} = \frac{\pi^2 \bar{D}_{11}}{a^2}; \quad \bar{q}_{\tau k} = \frac{2\pi^2 \bar{D}_{11}}{a^2} \sqrt{4 + 3 \frac{\sqrt{\bar{\alpha}_1}}{\bar{\alpha}_0} + \frac{\bar{\alpha}_0}{\sqrt{\bar{\alpha}_1}} \sqrt{\bar{\alpha}_0}}, \quad \text{де } \bar{\alpha}_0 = \frac{\bar{D}_3}{\bar{D}_{11}}; \bar{\alpha}_1 = \frac{\bar{D}_{22}}{\bar{D}_{11}}.$$

(7)

Для ребер з прямокутним поперечним перерізом

$$\bar{D}_{11} = \frac{E_1}{12(1-\nu_{12}^2)} \frac{b}{t} \delta^3 + (h + \delta)^3 - \frac{E_{cmp}}{12(1-\nu_{cmp}^2)} \delta^3.$$

Для ребер з поперечним перерізом у формі кутка

$$\bar{D}_{11} = \frac{E_1}{12(1-\nu_{12}^2)} \frac{\delta}{t} b^3 + \frac{b}{t} (\delta^3 - b^3) + \frac{E_{cmp}}{12(1-\nu_{cmp}^2)} [(h + \delta)^3 - \delta^3];$$

$$\bar{D}_{22} = \frac{E_2 [(h + \delta)^3 - h^3]}{12(1-\nu_{21}^2)}; \quad \bar{D}_3 = \frac{G_{12} [(h + \delta)^3 - h^3]}{12}.$$

Тут $\bar{D}_{11}, \bar{D}_{22}$ – згинальні жорсткості панелі з ребрами у напрямках, паралельному та перпендикулярному підкріплюючому набору відповідно; \bar{D}_3 – циліндрична жорсткість підкріпленої панелі; ν_{cmp} – коефіцієнт Пуассона матеріалу стрингерів. Обмеження по загальній втраті стійкості підкріпленої панелі мають вигляд:

$$\psi_5(\bar{X}) = q_{xk} - q_\sigma = 0; \quad \psi_6(\bar{X}) = q_{\tau k} - q_\tau = 0. \quad (8)$$

Компоненти матриці жорсткості для елементарного шару $[A^{(0)}]$ знаходять за [1], а інші компоненти квадратної матриці $[A^{(0)}]$ розміру 3×3 дорівнюють нулю.

Для розв'язання багатокритеріальної задачі використана модифікована людино-машинна процедура (ЛМП) побудови інтегрального критерія якості на основі принципу гарантованого результату [3], що дозволяє у діалоговому режимі особі, що приймає рішення (ОПР) і ЕОМ отримати компромісні розв'язки. Алгоритм складається із 6 кроків.

1. Кожному показнику якості $f_i(\bar{X}) (i = \overline{1, p})$ призначаємо ділянки нормальних значень

$$\Delta_i = [f_i^0, f_i^+]; \quad \Delta_i = [f_i^-, f_i^0] \quad (i = \overline{1, p}),$$

де f_i^+, f_i^- – обчислювані найкращі (субоптимальні) значення критеріїв оптимізації:

$$f_i^+ = \max_{\bar{X} \in D} f_i(\bar{X}); \quad f_i^- = \min_{\bar{X} \in D} f_i(\bar{X});$$

f_i^0 – квазінормативні значення показників якості, що призначаються ОПР, гірші за які мати оцінки по шкалах цих показників небажано.

2. Формуємо на основі заданих ділянок систему p вимог до якості конструкції: оцінка конструкції за шкалою i -го показника має відрізнятись від свого найкращого значення f_i^+ або f_i^- не більше ніж на величину $f_i^+ - f_i^0$ або $f_i^0 - f_i^-$.

3. Найбільше задоволення системі вимог дозволяє звести багатокритеріальну задачу

$$\{f_i(\bar{X})\} \rightarrow \underset{\bar{X} \in D}{opt}$$

при $\{f_i(\bar{X})\} \rightarrow \underset{\bar{X} \in D}{extr} \quad (i = \overline{1, p}); \quad D = \{\bar{X} : g_j(\bar{X}) \leq 0 \quad (j = \overline{1, r})\}$

до мінімізації інтегрального критерія оптимальності проекту конструкції.

4. Розрахункова модель оптимізації має вигляд:

$$F(\bar{X}) = \max_{i=\overline{1, p}} f_i(\bar{X}) \rightarrow \min; \\ f_i(\bar{X}) = \frac{f_i^+ - f_i(\bar{X})}{f_i^+ - f_i^0} \quad \text{при } extr = \max, \text{ або} \\ f_i(\bar{X}) = \frac{f_i(\bar{X}) - f_i^-}{f_i^0 - f_i^-} \quad \text{при } extr = \min.$$

5. Якщо серед критеріїв оптимізації є такі (такий), які у точці \bar{X} , що отримується з розв'язку розрахункової моделі, мають значення, що виходять за межі ділянок нормальних значень, то розв'язується наступна задача оптимізації:

$$F(\bar{X}) = \max_{i=\overline{1, p}} f_i(\bar{X}) \rightarrow \min; \\ D = \{\bar{X} : \bar{X} \in D, f_i(\bar{X}) \leq f_i^0 \quad f_i(\bar{X}) \geq f_i^0 \quad (i = \overline{p_1, p_2})\},$$

де p_1, p_2 – мінімальний і максимальний номери критеріїв, що виходять за межі Δ_i відповідно. Якщо отриманий розв'язок \bar{X}^* розрахункової моделі задовольняє ОПР, то його обираємо за оптимальний компромісний розв'язок багатокритеріальної задачі.

6. В іншому випадку ОПР перепризначає квазінормативні значення показників якості. Якщо проектувальник не може вказати деякі f_i^0 f_i^- або f_i^0 f_i^+ , то приймається $f_i^0 = f_i^-$ або $f_i^0 = f_i^+$ відповідно.

Список літератури

1. Alsubari S. M., Chaffoui H., Nagi S. (2024). Analysis of laminated Composite Structures. *Journal of Amran University*, № 04, p. 263-272.
2. Zhang T., Wei Z., Wang L., Xue Z., Wang S., Wang P., Qi B., Yue Z. (2025). Multi-objective optimization of composite stiffened panels for mass and buckling load using PNN-NSGA-III algorithm and TOPSIS method. *Thin-Walled Structures*, № 209, p. 112878. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112878>.
3. Мормуль М. Ф., Щитов О. М., Рудянова Т. М. (2023). Питання багатокритеріального вибору управлінських рішень. *Global science and education in the modern realities '2023*. Washington, USA, с. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.30888/2709-2267.2023-18-01-010>.
4. Мормуль М. Ф., Щитов Д. М., Щитов О. М., Рудянова Т. М. Аспекти багатокритеріального вибору управлінських рішень. *SWorld Journal*. 2023. № 19, part 1. С. 64-76. DOI: [10.30888/2663-5712.2023-19-01-018](https://doi.org/10.30888/2663-5712.2023-19-01-018)

СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНА МОДЕЛЬ КОНТАКТУ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ОБОЛОНКОВОЇ СТРУКТУРИ З ЛОЖЕМЕНТОМ

О.Є. Кучеренко, В.А. Блажко

Інститут технічної механіки НАН і ДКА України

Розглядається задача скінченно-елементного моделювання [1] горизонтального сталевого резервуара об'ємом 50 м³, який спирається на дві сідлові опори і зазнає впливу статичних навантажень. Модель представлена у вісесиметричному вигляді. Для моделювання горизонтальної оболонки та ложементів використовуються оболонкові елементи (SHELL281) та тривимірні елементи (SOLID186) відповідно. У зоні контакту застосовуються просторові контактні елементи. Ребра жорсткості моделюються за допомогою стрижневих елементів з трьома вузлами, які базуються на теорії балки Тимошенка [2]. Можливе неповне прилягання поверхонь контакту резервуара та основи, зокрема, через розбіжність їхніх радіусів.

Досліджується напружено-деформований стан циліндричної стінки (рис. 1). Чисельно розв'язується задача визначення контактної тиску p при різних значеннях величини початкового зазору (варіюється від 0 до 4 см) між оболонкою та ложементом, проводиться аналіз зони контакту системи «ребро жорсткості–оболонка–ложемент» за дії гідростатичного тиску (рис. 2). Для верифікації скінченно-елементної моделі контакту застосовується модель Вінклера $p = -c \cdot w$, де c – жорсткість основи, w – радіальний зсув контактної поверхні [3]. Порівнюється розподіл контактної тиску, що його отримано за допомогою чисельного моделювання, зі значеннями, обчисленими за допомогою моделі Вінклера. Розбіжність не перевищує 16%, що свідчить про адекватність скінченно-елементної моделі.

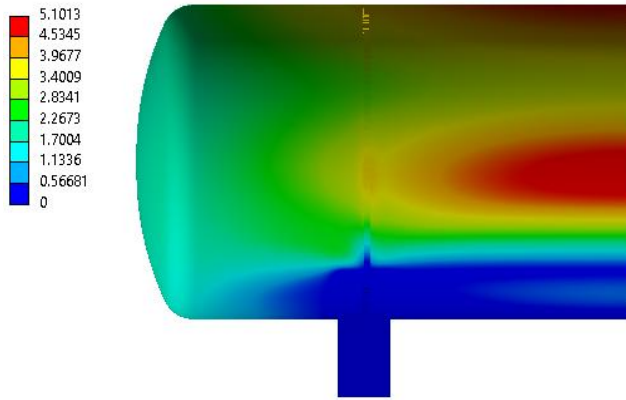


Рис. 1. Розподіл деформацій в оболонці.

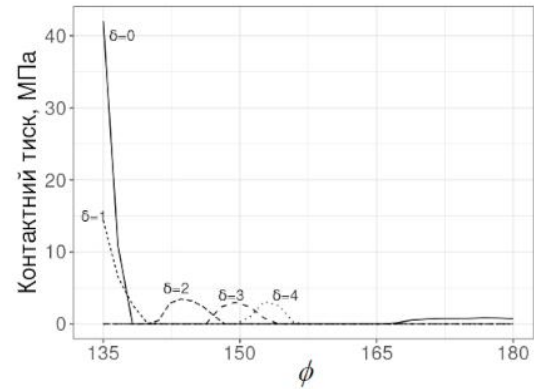


Рис. 2. Залежність контактної тиску від кута ϕ за різних значень зазору δ .

1. Brenner S.C., Scott L.R. The Mathematical Theory of Finite Element Methods. New York: Springer, 2008. 400 p.
2. Hauck B., Szekrenyes A. Enhanced beam and plate finite elements with shear stress continuity for compressible sandwich structures. Mathematics and Mechanics of Solids. 2024. Vol. 29(7). P. 1325–1363.
3. Власов В.З., Леонтьев Н.Н. Балки, плиты и оболочки на упругом основании. Москва: Физматгиз, 1960. 491 с.

ГІДРОМЕХАНІЧНІ РИЗИКИ, ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ ЗАТРИМКОЮ ВСТАНОВЛЕННЯ КРІПЛЕННЯ ПРИ ПРОХОДЦІ ТУНЕЛІВ В ТРІЩИНУВАТИХ ПОРОДАХ

О.П. Круковський, В.В. Круковська

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

Грунтові води є одним із ключових факторів, що впливають на стабільність та безпеку тунелів, особливо на ранніх стадіях будівництва, коли тимчасове кріплення та облицювання ще не встановлені. Затримки на цьому етапі можуть призвести до збільшення деформації гірського масиву, розширення проникної зони, значного притоку ґрунтових вод і негативного впливу на навколишнє середовище. В цій роботі за допомогою чисельного моделювання досліджено зв'язані процеси пружно-пластичного деформування масиву та фільтрації ґрунтових вод [1] у тунель, що споруджується в інтенсивно тріщинуватих скельних породах на глибині 50 м. Ураховується залежність проникності породи від зміни напруженого стану [2]. Висота тунелю – 6,1 м, ширина – 6,0 м; рівень підземних вод – 3 м від поверхні; модуль пружності породи – 2500 МПа; міцність на стиск – 1 МПа; початкова проникність $k_0 = 0,01$ м/с. Результати розрахунків в момент часу $t = 8$ діб показано на рис. 1.

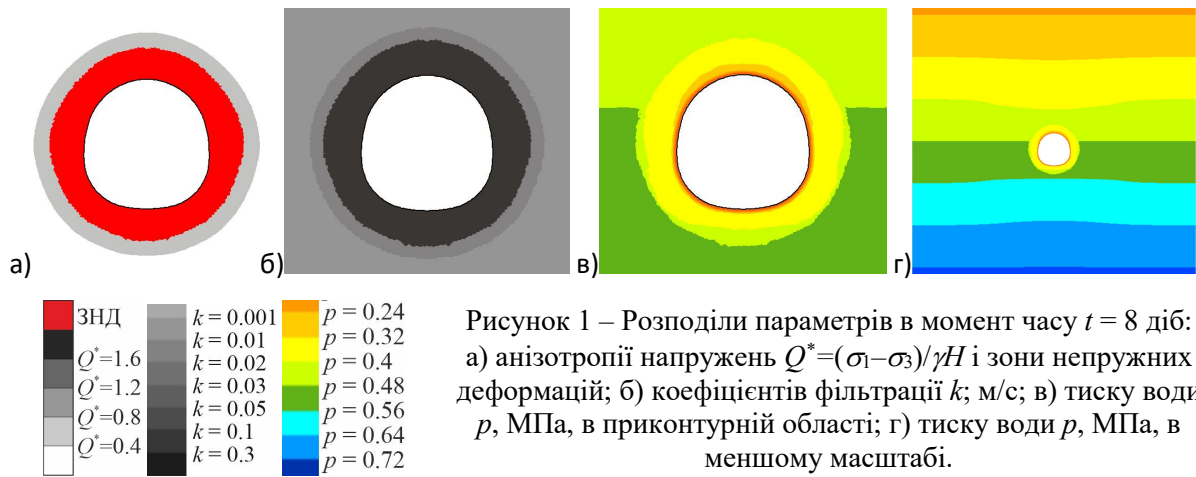


Рисунок 1 – Розподіли параметрів в момент часу $t = 8$ діб:
 а) анізотропії напружень $Q^*=(\sigma_1-\sigma_3)/\gamma H$ і зони непружних деформацій; б) коефіцієнтів фільтрації k ; м/с; в) тиску води p , МПа, в приконтурній області; г) тиску води p , МПа, в меншому масштабі.

Результати показують, що зі збільшенням тріщинуватості міцність гірських порід знижується, анізотропія напружень зменшується, а схильність до крихкого руйнування зростає (рис. 1а). Ці умови призводять до виражених зсувів стінок тунелю, підвищеної проникності поблизу контуру (рис. 1б) і до утворення локальної воронки депресії (рис. 1г) на восьмий день після відходу вибою, що у подальшому загрожує зниженням рівня ґрунтових вод. Таким чином, висока проникність порушених зон інтенсифікує фільтраційні процеси: у приконтурних областях відбувається зміна природного гідродинамічного режиму, що може вплинути на водозабори, природні джерела, осушення ґрунтів та осідання ґрунту через втрату порового тиску.

Результати роботи підтверджують, що при спорудженні тунелів необхідно мінімізувати інтервал між виїмкою породи та встановленням тимчасового кріплення й герметизації, особливо в інтенсивно порушених зонах.

Література

1. Krukovska V.V., Vynohradov Y.O. (2019) Water stability influence of host rocks on the process of water filtration into mine working with frame and roof-bolting support, E3S Web Conf., 109, 00041. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900041>
2. Krukovskiy O., Krukovska V., Yanzhula O., Imashev A. (2025), Numerical study of geomechanical and filtration parameters in the near-face zone of a coal seam during hydraulic extrusion, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, №1491, 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1491/1/012057>

ВПЛИВ ЛІТОЛОГІЧНОГО СКЛАДУ НА РОЗВАНТАЖЕННЯ ПОРІД ПІДОШВИ ОЧИСНОЇ ВИРОБКИ З МЕХАНІЗОВАНИМ КРІПЛЕННЯМ

В.В. Круковська¹, А.О. Костриця²

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

²Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки
 ім. М.С. Полякова НАН України

Викидонебезпечні пісковики, що залягають у підшві вугільних пластів, становлять значну загрозу під час ведення очисних робіт, особливо при буропідривних операціях. Контрольоване розвантаження порід дозволяє зменшити накопичену енергію деформації масиву і сприяє дегазації, тому метою роботи було дослідження впливу літологічного складу порід на їх розвантаження під час очисних робіт.

Виконано чисельне моделювання зв'язаних процесів пружно-пластичного деформування породного масиву та фільтрації газу [1]. Залежність проникності від напруженого стану враховувалась за співвідношеннями, запропонованими авторами раніше [2]. При варіюванні потужності $m_{ал}$ шару алевроліту над викидонебезпечним пісковиком від 0 до 3 м, було показано, що літологічна будова підшви вугільного

пласта суттєво впливає на формування зон розвантаження (рис.1). Зі збільшенням потужності шару алевроліту над пісковиком зростає площа зон підвищених напружень ($R^* > 0,8$), що сприяє накопиченню енергії і зростанню викиднебезпеки [3].

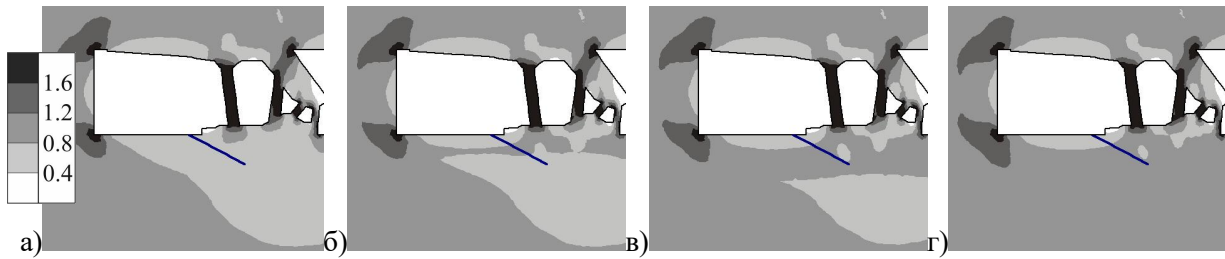


Рисунок 1. Концентрація напружень ($R^* = \sigma_1/\gamma H$) навколо очисної виробки: а) $m_{ал} = 0,0$ м; б) $m_{ал} = 0,5$ м; в) $m_{ал} = 1,0$ м; г) $m_{ал} = 3,0$ м

Моделювання фільтрації метану підтвердило, що прошарки алевроліту істотно зменшують інтенсивність дегазації пісковика. За товщини прошарку понад 1 м фільтрація практично припиняється, що створює умови для підвищеного газонакопичення та потенційного викиду при раптовому розвантаженні. Найсприятливіші умови для безпечної роботи спостерігаються у варіанті без прошарку алевроліту – тоді у підшві формується зона зі зниженими напруженнями ($R^* < 0.8$) і відбувається дегазація пісковика.

Отримані результати підтверджують, що для прогнозу і попередження викидів у пісковиках необхідно враховувати просторову мінливість літологічного складу підшви пласта, оскільки навіть тонкий шар малопроникного алевроліту може істотно змінити геомеханічний і газодинамічний стан масиву.

Література

1. Krukovskyi, O.P., Krukovska, V.V., Kostytsia, A.O. (2024). Numerical study of time-dependent stresses in the floor of the stope with powered support. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 970 (1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012030>
2. Krukovska, V.V., Krukovskyi, O.P. (2023). Formation of the near-face stress field under the influence of natural and technological factors. Geo-Technical Mechanics, 165, 97-116. <https://doi.org/10.15407/geotm2023.165.097>
3. Krukovska, V.V., Krukovskyi, O.P., Yanzhula, O.S., Kostytsia, A.O., Kocherga, V.M. (2024). The influence of the features of outburst-prone rocks position in the floor of the stope on stress fields and degasation process. Geo-Technical Mechanics, 168, 139-151. <https://doi.org/10.15407/geotm2024.168.139>

TWO-DIMENSIONAL BLAST-WAVE SIMULATION IN AN IDEAL GAS VIA FEM

D.O. Krukovskyi

Dnipro University of Technology

Explosions in underground structures are an extremely hazardous factor capable of causing structural collapse, fires, and loss of life. Ensuring safety requires that research into these complex processes be grounded in robust data and modelling that reflects their specifics. Accordingly, the aim of this work is to develop a mathematical model of blast-wave propagation in a gaseous medium using the conservation equations for an ideal gas, and to implement it numerically using FEM.

A two-dimensional finite-element framework is presented for simulating blast-wave dynamics in a compressible ideal gas. The Euler equations (mass, momentum, energy) are cast in variational form and discretized with linear elements; inter-element stabilization is provided by a local Lax–Friedrichs (Rusanov) numerical flux with characteristic speed $\lambda = |u|$

+ *c*. Time integration is performed by explicit Euler under a CFL constraint. A localized energy release E_0 at $t = 0$ is modeled, and open (non-reflecting) boundaries are used. A C# implementation is used to advance the conservative fields ρ , ρu , ρv , and E , producing maps of pressure, density, and energy, as well as pointwise time histories. For reproducibility, mesh resolution, time-step selection, and source parameters are specified; mesh-refinement checks indicate stable shock location and consistent integral diagnostics under grid coarsening/refinement.

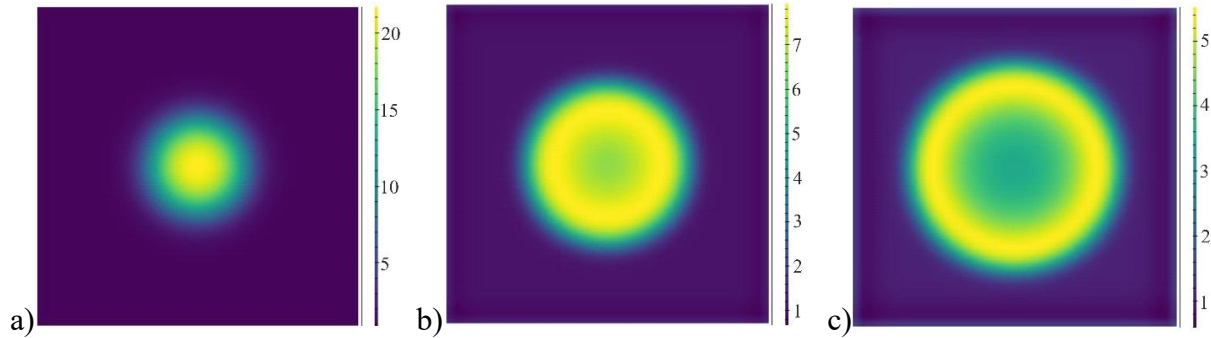


Figure 1. Distributions of gas pressure p : a) $t = 0.2$ s; b) $t = 0.6$ s; c) $t = 1.0$ s

The simulations reproduce the canonical blast sequence – formation of a strong shock, a positive overpressure phase, and a subsequent rarefaction. This is illustrated by pressure fields at $t = 0.2$ s, 0.6 s, and 1.0 s (Fig. 1a–c) – with a compact high-pressure kernel and sharply defined shock ring, a positive overpressure phase with a supersonic front, and a subsequent rarefaction where pressure undershoots ambient and density drops below its initial value. Spatial sections show near-radial symmetry of the front (Fig. 1); time traces at monitoring points exhibit the expected spike–decay–undershoot in $p(t)$ and compression–then–expansion in $\rho(t)$. Peak overpressure, positive-phase duration, impulse $\int(p - p_0)dt$, and shock speed from radius–time curves are computed directly from the solution, enabling sensitivity studies to source strength E_0 , ambient density, and boundary type. In addition, monitoring points placed at prescribed radii provide arrival times and impulses for direct comparison across scenarios, and the discrete update conserves mass, momentum, and energy to solver tolerance over the simulated window. Numerically, the scheme preserves Rankine–Hugoniot jump conditions and remains stable under standard CFL limits. The framework is lightweight for scenario screening yet extensible to viscosity/heat conduction, multispecies/reacting flow, and fluid–structure interaction in confined or tunnel-like geometries.

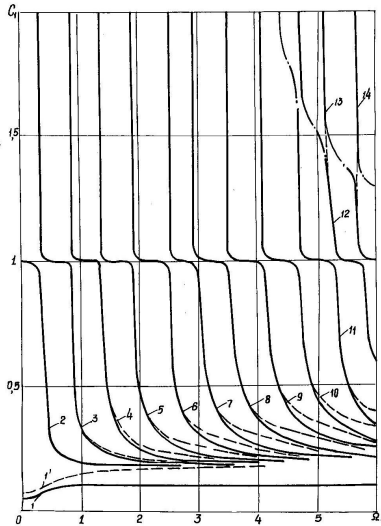
ЧАСТОТНІ СПЕКТРИ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ В ОБОЛОНЦІ З В'ЯЗКОЮ РІДИНОЮ ПРИ ДВОХ ТЕОРІЯХ ОБОЛОНОК

Г.І. Щурук

Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України

Важливими в практичному та теоретичному значенні є дослідження поширення хвиль у системах оболонка – рідина. Широке застосування в інженерній практиці знаходять сучасні композитні матеріали, які є конструктивно неоднорідними та характеризуються низькою зсувною жорсткістю. В зв'язку з тим, що в'язка стислива рідина передає стінці оболонки не тільки нормальний тиск, але і дотичні зусилля, вона може впливати на хвильові процеси в гідродинамічній системі. При вивченні таких процесів в ортотропній циліндричній оболонці, яка містить в'язку рідину, виникає потреба в отриманні частотних спектрів для різних моделей оболонок і виявленні їх можливостей.

В роботі розглянуто осесиметричні хвильові процеси в системі ортотропна циліндрична оболонка – в'язка стислива рідина. Аналіз проведено в рамках лінеаризованих рівнянь Нав'є – Стокса для в'язкої стислої рідини [1] та моделей Кірхгофа – Лява і Тимошенка для ортотропної оболонки. Досліджено частотний спектр, дисперсійні властивості хвиль, що розповсюджуються в системі, та вплив на них деформації зсуву та інерції обертання.



Обчислення проведені для боропластикової оболонки з параметрами $E_1=241,564 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$; $E_2=15,351 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$; $G_{12}=G_{13}=5,416 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$; $G_{23}=4,862 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$; $\nu_{12}=0,28$; $\nu_{21}=0,0178$; $k_0=2h/R=0,125$; $\rho_{06}=2,04 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ та рідини з параметрами $\rho^*=1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\mu^*=1,393 \text{ кг/(м сек)}$; $a_0=1927 \text{ м/сек}$ в широкому діапазоні частот $0 < \Omega_1 < 6$.

На рисунку зображено дисперсійні криві, отримані для такої гідропружної системи при застосуванні гіпотез Тимошенка (суцільні криві) та Кірхгофа – Лява (штрихові лінії). Штрих-пунктирними лініями показано ділянки дисперсійних кривих, які з'єднуються при відсутності рідини в системі та перетворюються в третю дисперсійну криву для «порожньої» оболонки (для частот $\Omega_1 < 4$), яка визначається тільки при застосуванні теорії Тимошенка. Якщо знехтувати деформацією поперечного зсуву та інерцією обертання нормальних елементів оболонки, тобто провести обчислення за теорією Кірхгофа – Лява, ці частини дисперсійних кривих (штрих-пунктирні) будуть відсутніми, а також відповідно до цієї теорії отримуємо збільшені значення величин фазових швидкостей першої моди та мод вищих порядків у порівнянні з моделлю Тимошенка. Наприклад, при частоті $\Omega_1=5$ знехтування інерцією обертання та зсувом призводить до збільшення фазової швидкості першої моди на 62%, восьмої – на 15%, а сьомої – на 17%.

Обчислення показали можливості двох оболонкових теорій при розробці та використанні хвильових процесів в оболонках з композитних матеріалів з низькою зсувною жорсткістю, що заповнені в'язкою рідиною, які надають інформацію якісного та кількісного характеру.

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

ВПЛИВ АГРЕСИВНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА МЕТАЛЕВЕ КРІПЛЕННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

Ю.О. Виноградов

*Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки
ім. М.С. Полякова НАН України*

Основними типами кріплення, що застосовуються у вугільних шахтах України, є металеве рамне та анкерне кріплення. За результатами досліджень встановлено, що внаслідок дії корозійних процесів близько 10–15 % металу безповоротно втрачається. В умовах агресивного шахтного середовища міцність елементів металевих рамних кріплень може знижуватися до 30 % уже протягом першого року експлуатації [2, 3].

Загалом у підземних виробках ознаки корозійного ураження спостерігаються у 60-80 % металевих конструкцій.

Було побудовано скінченно-елементну модель породного масиву з гірничою виробкою аркового перерізу, закріплену металевим рамним кріпленням, в покрівлі якої розташований обводнений пласт. Виконано чисельне моделювання деформування порід і кріплення та корозії металевої рами в місцях контакту із вологою. Потім було розраховано поля напружень в породах навколо виробки і в кріпленні в різні моменти часу.

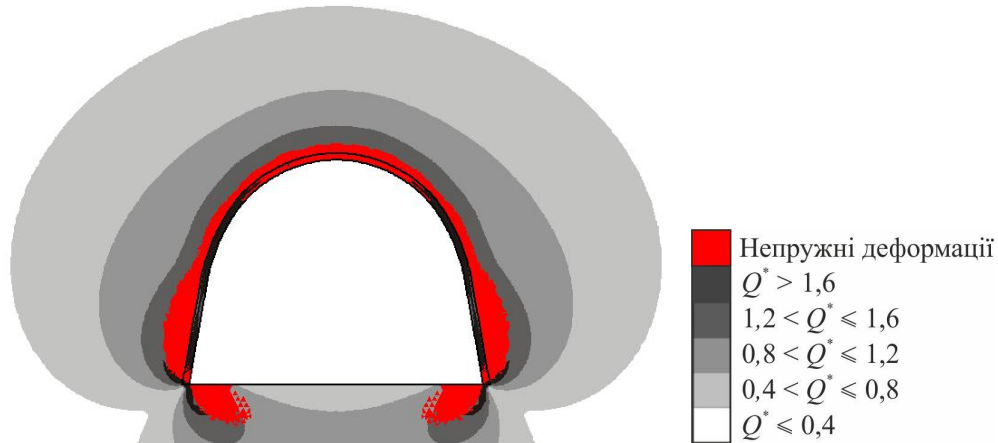


Рисунок 1. Розподіл значень параметра Q^* , МПа, і зони непружних деформацій

У результаті виконаних розрахунків отримано розподіли полів напружень. Встановлено, що у місцях контакту з водою відбувається розвиток корозійних процесів, що спричиняють поступове зниження міцності металу. Найінтенсивніше руйнування спостерігається у верхній частині рами (верхняку), оскільки саме ця зона першою піддається впливу вологи [3]. Також було визначено втрату міцності металевого кріплення внаслідок корозії за період двох років експлуатації в агресивному середовищі.

Література

1. Коваленко В.В. (2012). Защита металлической крепи от коррозии с использованием торкрет-бетона / В.В. Коваленко. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 108 с.
2. Компанец, В.Ф. (1995). Совершенствование сталей для крепей и защита их от коррозии / В.Ф. Компанец // Уголь Украины. – № 9. – С. 16 – 18.
3. Круковський О.П., Круковська В.В., Виноградов Ю.О. (2024). Дослідження процесу корозійного руйнування металевого кріплення гірничих виробок. Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва, 2024. – № 26 – С. 56-64. <https://doi.org/10.37101/ftpgv26.01.004>

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНОГО ТІЛА ЗА ДІЇ ЗМІННОГО ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ

Є.М. Ірза

*Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача
НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3-б; Evgen_Irza@ukr.net*

Запропоновано методику розрахунку напружено-деформованого стану пружних структурно неоднорідних тіл за дії змінного внутрішнього тиску. Розроблено числовий алгоритм розв'язання відповідної задачі.

Задачу про визначення напружено-деформованого стану в тілі сформульовано у квазістатичній постановці в переміщеннях. Фізико-механічні характеристики матеріалу тіла розглянуто залежними від просторових координат \vec{r} .

Тіло перебуває за умов технологічного навантаження у вигляді змінного внутрішнього тиску.

Зв'язок між компонентами тензорів напружень $\{\sigma\}$ і деформацій $\{\varepsilon\}$ беремо у вигляді (закон Гука):

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad \vec{r} \in \Omega, \quad (1)$$

де $\{\sigma\}$, $\{\varepsilon\}$ – компоненти тензора напружень і деформацій відповідно; $[D]$ – матриця фізико-механічних характеристик матеріалу тіла.

Обмежуємося випадком малих деформацій. За таких умов зв'язок між деформаціями і переміщеннями набуває вигляду

$$\{\varepsilon\} = [Z]\{u\}. \quad (2)$$

Тут $[Z]$ – матриця диференціального оператора геометричних співвідношень.

У тілі виконуються також рівняння рівноваги

$$[Z]^T \{\sigma\} + X = 0, \quad \vec{r} \in \Omega \quad (3)$$

і крайові умови

$$\vec{n} \vec{\sigma}^i = p^i, \quad \vec{r} \in \Gamma_\sigma; \quad \vec{u} = \vec{u}_0, \quad \vec{r} \in \Gamma_u, \quad i = \overline{1,3}. \quad (4)$$

Тут X^i – контраваріантні компоненти вектора об'ємних сил; $\vec{\sigma}^i = \sigma^{ij} \vec{e}_j$; \vec{e}_j – вектори коваріантного базису вибраної криволінійної системи координат, $p^i(\tau)$ – компоненти внутрішнього силового навантаження, яке змінне в часі τ .

Залежності (1)–(4) утворюють повну систему співвідношень для визначення компонент вектора переміщень \vec{u} , компонент тензорів деформацій ε і напружень σ при об'ємних силах \vec{X} і внутрішньому силовому навантаженні \vec{p} .

Для розв'язування використано метод зважених залишків в поєднанні з скінченно-елементним підходом.

В результаті стандартної скінченно-елементної дискретизації системи рівнянь (1)–(4), отримано систему алгебраїчних рівнянь

$$[K_u]\{U(\tau_{i+1})\} = \{F_0(\tau_{i+1})\}, \quad (5)$$

для розглядуваного моменту часу, де $[K_u]$, $\{F_0\}$ – відповідно матриця жорсткості і вектор навантаження. Систему рівнянь (5) розв'язано за допомогою ітераційного методу. Напруження в тілі знаходимо за відомими переміщеннями з допомогою співвідношень (1) та (2).

Розраховано напружено-деформований стан структурно неоднорідного порожнистого циліндра за дії змінного внутрішнього тиску $\vec{p}(\tau)$.

ВПЛИВ СКІНЧЕННИХ ПОЧАТКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ПОВЕРХНЕВУ СТІЙКІСТЬ НЕСТИСЛИВОГО ПРУЖНОГО ШАРУ, ЩО ВЗАЄМОДІЄ З ПІВПРОСТОРОМ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ

О. М. Багно

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ
e-mail: desc@inmech.kiev.ua

Дослідженню закономірностей поширення узагальнених квазілембових хвиль в гідропружних хвилеводах присвячена значна кількість публікацій. У більшості робіт наведено результати дослідження впливу початкових напружень та рідини, в основному, на дисперсійні та кінематичні характеристики хвильового процесу. Разом з тим, великі (скінченні) початкові деформації можуть привести до виникнення в гідропружному хвилеводі поверхневої нестійкості. Це явище призводить до замикання хвилеводу, припинення процесу поширення хвиль та перенесення хвильової енергії.

У роботі для дослідження явища втрати поверхневої стійкості гідропружною системою, яка складається з нестисливого пружного шару, підданого великим (скінченним) початковим деформаціям і півпростору в'язкої стисливої рідини, залучаються моделі попередньо напруженого тіла та в'язкої стисливої рідини. При цьому використовуються тривимірні лінеаризовані рівняння теорії пружності скінченних деформацій для пружного тіла і тривимірні лінеаризовані рівняння Нав'є – Стокса для в'язкої стисливої рідини [1, 2]. Обрано постановки задач і метод, що ґрунтуються на застосуванні представлень загальних розв'язків рівнянь руху пружного тіла та рідини, які запропоновані в роботах [1, 2].

Для гідропружної системи розв'язано дві задачі про власні значення для рівнянь руху пружного тіла та рідини, а також визначено відповідні власні функції. Далі, застосовуючи метод Фур'є, отримано дисперсійне рівняння. Показано, що воно є найбільш загальним і не залежить від форми пружного потенціалу та отримано для нестисливих пружних тіл, підданих великим (скінченним) початковим деформаціям, які взаємодіють з в'язкою стислою рідиною. У подальшому дисперсійне рівняння розв'язувалося чисельно. Розрахунки проводилися для гідропружної системи, яка складалася з реальних пружного тіла та рідини. Встановлено, що у гідропружній системі, яка складається з пружного шару і півпростору ідеальної рідини [3], втрата поверхневої стійкості виникає раніше, ніж у суто пружному шарі, але пізніше, ніж у гідропружній системі з в'язким рідким півпростором. Із аналізу отриманих числових результатів випливає, що наявність півпростору в'язкої стисливої рідини призводить до зниження порогу поверхневої нестійкості гідропружного хвилеводу і виникнення її раніше при меншому стисканні.

1. Гузь А. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями: в 2-х частях. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 501 с., – 505 с.
2. Гузь А.Н. Введение в динамику сжимаемой вязкой жидкости. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2017. – 244 с.
3. Bagno A.M., Shchuruk G.I. Effect of Half-space of Ideal Fluid on Surface Instability of Incompressible Elastic Layer Subjected to Finite Initial Deformations // Int. Appl. Mech. – 2024. – 60, N 5. – P. 560 – 567.

ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ

М. Хом'як, Н. Лопух

ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

Моделювання з використанням параметрів, що можуть поєднувати всі або різні етапи, – від ідеї та постановки задачі до аналізу результатів, – є інтуїтивно зрозумілим підходом і широко використовується в сучасних теоретичних і прикладних дослідженнях. Модель-екземпляр асоціюють з певним набором числових характеристик з простору допустимих значень, які включають індивідуальні риси об'єкта (геометрію), внутрішній стан (фізико-механічні властивості) та зовнішні умови (крайові умови та навантаження). Тому модель-еталон (абстрактна модель з параметрами) має створюватися за досить широкого діапазону припущень (порівняно з частковим випадками і тестовими задачами, іноді достатньо простими), відстежувати взаємозв'язки між параметрами і забезпечувати ефективні та швидкі зміни і, відповідно, перерахунок задачі. Наявність десятків, а то й значно більше параметрів різноманітної природи не дає змоги, на жаль, запропонувати деяку універсальну модель. З іншого боку, це робить актуальним розвинення параметричних моделей, зокрема, для розрахунків НДС складних конструкцій, які включають елементи просторового (solid) та оболонкового (shell) типів.

Сучасне програмне забезпечення скінченно-елементного аналізу (ANSYS, ABAQUS тощо), як правило, підтримує використання параметрів та залежність моделі від них, принаймні, на рівні мови скриптів. Одним з основних завдань параметричного моделювання є створення параметричних математичних моделей, що описують залежності моделі від параметрів, зв'язки між параметрами, а також програмна реалізація параметричної моделі в межах деякої концепції (наприклад, побудови скінченно-елементного розбиття області, що допускає варіативність вибору типів solid-або shell-елементів). У результаті ми отримуємо комбіновані моделі, які достатньо адекватно моделюють поля напружень тонкостінних елементів, але враховують особливості просторових підобластей та інших конструктивних неоднорідностей. Такий підхід є альтернативою “екстенсивного” застосування МСЕ в тривимірній постановці, що полягає в однорідному згущенні розбиття для усіх частин і призводить часто до неефективного використання обчислювальних ресурсів (мільйони ступенів вільності, значний час розрахунків).

Як приклад, розглянуто параметричну модель навантаження внутрішнім тиском півсферичної оболонки, підкріпленої шпангоутом по екватору, яка містить ділянки різної товщини, в осесиметричній постановці. Виконано порівняльний аналіз напружень з використанням лінійчатих (оболонкових) та 2D-елементів квадратичного типу. Запропоновано ефективніші (зі значно меншою кількістю рівнянь розв'язувальної системи) комбіновані моделі. Планується розвивати дослідження типових задач стосовно врахування конструктивної неоднорідності в коловому напрямі, тобто створення тривимірних неосесиметричних моделей. Створення програмних інструментів ведення баз даних щодо побудови області та їхнього SE-розбиття також дасть змогу адаптувати запропонований підхід до нових об'єктів або розширювати параметричну модель як таку.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ КРУЧЕННЯ В ШАРУВАТИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛАХ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ ПРИ УМОВАХ ПОВНОГО ПРОКОВЗУВАННЯ ШАРІВ

А. Ю. Глухов

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

Шаруваті композитні матеріали знаходять широке застосування в аерокосмічній техніці, суднобудуванні, транспортному машинобудуванні та інших критично важливих галузях промисловості завдяки унікальному поєднанню високої міцності, корозійної стійкості та інших експлуатаційних характеристик.

Більшість сучасних досліджень поширення хвиль у таких матеріалах виконано для ідеального контакту між шарами, тоді як реальні технологічні умови часто призводять до неповного контакту або проковзування.

Мета роботи полягає у дослідженні закономірностей поширення пружних хвиль кручення в шаруватих нестисливих композитних матеріалах з початковими напруженнями для випадку повного проковзування між шарами.

Дослідження виконані в рамках лінеаризованої теорії пружності для тіл з початковими напруженнями з використанням методу, викладеного в монографії [1].

Розглядається шаруватий композитний нестисливий матеріал з початковими напруженнями, який складається з двох типів шарів, що періодично чергуються. Матеріали шарів і їх початкові напружено-деформовані стани є однаковими для кожного типу шарів. Початковий напружений стан вважається однорідним.

Задача зводиться до побудови розв'язків рівняння відносно амплітудної функції при виконанні умов неперервності в площинах розділу шарів і умов періодичності Флоке.

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

Встановлено, що між шарами композитного матеріалу у випадку проковзування не відбувається взаємодії. Проаналізовано залежність швидкостей поширення симетричних і антисиметричних хвиль кручення від початкових напружень у шарах нестисливого композитного матеріалу.

Проведене дослідження доводить принципово інший характер поширення хвиль кручення в шаруватих композитах при умовах повного проковзування порівняно з випадком ідеального контакту.

Отримані результати мають важливе значення для:

- розробки точних методів прогнозування довговічності шаруватих конструкцій;
- створення надійних моделей поведінки матеріалів в екстремальних умовах;
- оптимізації технологічних процесів виробництва композитних матеріалів;
- розвитку методів неруйнівного контролю якості адгезійних з'єднань.

Література

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

РЕГУЛЯЦІЙНО-СПЕКТРАЛЬНИЙ МЕТОД ЗІ СТРУКТУРНОЮ РЕГУЛЯРИЗАЦІЄЮ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ШАРУВАТИХ КОНСТРУКЦІЙ

Ю. П. Глухов

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

У сучасній механіці деформованого тіла широко використовуються інтегрально-спектральні та матричні методи розв'язання задач динаміки шаруватих середовищ. Методи типу інтегральних перетворень Фур'є, Ганкеля та Лапласа забезпечують аналітичну строгість і дозволяють одержувати точні розв'язки для нескінченних або напівнескінченних середовищ, однак потребують додаткової регуляризації спектральних інтегралів та коректного вибору контурів інтегрування, що ускладнює їх застосування в чисельних розрахунках. У свою чергу, матричні методи ефективно реалізують узгодження граничних умов між шарами, але часто втрачають числову стабільність при великій товщині шарів або контрасті механічних параметрів.

Для аналізу динамічної поведінки багатошарових пружних середовищ під дією рухомих або гармонічних навантажень запропоновано регуляційно-спектральний метод зі структурною регуляризацією

Метод базується на застосуванні інтегрального перетворення Фур'є для переходу до спектральної області та подальшому відновленні хвильового поля за збіжним спектральним інтегралом.

Збіжність інтегралів досягається конструктивно — завдяки структурній регуляризації, що передбачає відбір фізично допустимих хвильових складових, які задовольняють радіаційні умови.

Для опису взаємодії шарів введено систему регуляційних коефіцієнтів, які забезпечують енергетичну узгодженість і чисельну стабільність розв'язку.

Використання регуляційних коефіцієнтів дозволяє описати передачу хвильової енергії між шарами у компактній і стійкій формі, що забезпечує збалансованість хвильових полів і коректність енергетичного обміну.

Це забезпечує можливість моделювання складних хвильових процесів у багатошарових середовищах без необхідності додаткової регуляризації або деформації контурів інтегрування.

Запропонований у роботі регуляційно-спектральний метод зі структурною регуляризацією поєднує аналітичну точність спектральних підходів із числовою стабільністю матричних схем.

Таким чином, розроблений метод займає проміжне місце між класичними інтегральними та матричними підходами, реалізуючи їхні переваги в єдиній узгодженій формі:

- від інтегральних методів він успадковує фізичну повноту спектрального опису;
- від матричних — ефективність і стабільність числової реалізації.

Запропонований підхід поєднує аналітичну точність і фізичну коректність із обчислювальною ефективністю, що робить його придатним для дослідження хвильових процесів у багатошарових конструкціях, геоматеріалах та технічних основах.

ЛОКАЛЬНА ВТРАТА СТІЙКОСТІ ПРИ СТИСКУ ВОЛОКНИСТО-МЕТАЛЕВОГО ЛАМІНАТУ ІЗ ПРИПОВЕРХНЕВИМ РОЗШАРУВАННЯМ

В.М. Бистров, В.А. Декрет, В.С. Зеленський, О.А. Проценко

*Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАНУ,
вул. П. Нестерова, 3, Київ, Україна
e-mail: umer@inmech.kiev.ua*

Волокнисто-металеві шаруваті композити (FML, Fiber Metal Laminates) складаються з легких металевих шарів та волокнистих прошарків, зокрема, як у матеріалів класу GLARE, що поєднують алюміній зі склопластиком. Такі системи вирізняються високими питомими міцністю, жорсткістю та втомною довговічністю, тому мають значні перспективи для використання в авіаційних тонкостінних конструкціях. Попри широке застосування GLARE за кордоном, в Україні дослідження та практичне впровадження FML залишаються обмеженими. Результати, отримані в роботі, можуть підвищити інтерес до цього класу матеріалів та подальшому вивченню можливостей їх застосування у вітчизняній авіаційній інженерії.

Характерним видом пошкодження у FML є приповерхнєве розшарування на межі розділу металевих та склопластикових шарів, яке може виникати через виробничі дефекти, залишкові термічні напруження, механічні удари або циклічні навантаження. Після ініціювання розшарування знижує жорсткість і несну здатність ламінату. За умов стискального навантаження зони розшарування можуть спричинити втрату стійкості розшарування – окремий вид руйнування, що характеризується локальною втратою стійкості в околі міжшарової межі (Delamination Buckling) [1, 2]. Ця нестабільність згодом може сприяти зростанню розшарування і, в крайніх випадках, призвести до катастрофічного руйнування конструкції.

У роботі визначено критичні навантаження локальної втрати стійкості в ламінатах GLARE 2 та GLARE 4 з приповерхневими розшаруваннями. Розрахунки виконано на основі тривимірної лінеаризованої теорії стійкості деформівного тіла (ТЛТСДТ) [3], а отримані результати зіставлено з результатами аналітичного балкового наближення (*Beam Approximation*). Математична модель, що застосована в роботі, відповідає точному підходу до розв'язання задач механіки композитів на основі рівнянь теорії пружності та другого варіанту ТЛТСДТ в рамках моделі кусково-однорідного середовища. Задача розглядається для випадку плоскої деформації. Використовується статичний метод дослідження задач ТЛТСДТ, при якому розв'язується узагальнена задача на власні значення. При балковому наближенні на основі аналітичного розв'язку, наведеного у роботі [1], досліджується втрата стійкості відшарованої пластини, утвореної тріщиною та вільною поверхнею алюмінієвого шару. Для торців пластини задаються умови жорсткого защемлення із заданим переміщенням у напрямку стиску. Чисельний розв'язок задачі отримано методом сіток в рамках концепції базових різницевих схем [4]. Використані обчислювальні алгоритми та технологія проведення розрахунків орієнтовані на застосування паралельного програмного забезпечення.

Розглядаються композитні ламінати GLARE 2-3/2 та GLARE 4-3/2 які складається з трьох шарів алюмінієвого сплаву 2024-T3 і двох шарів склопластику з орієнтацією волокон $0^\circ/0^\circ$, $90^\circ/90^\circ$ та $0^\circ/90^\circ/0^\circ$, $90^\circ/0^\circ/90^\circ$ відповідно. Досліджуються зразки у вигляді прямокутних шаруватих пластин із центральною наскрізною міжшаровою тріщиною біля поверхневого шару алюмінію. Відповідні розрахункові схеми представлені на рис.1, а

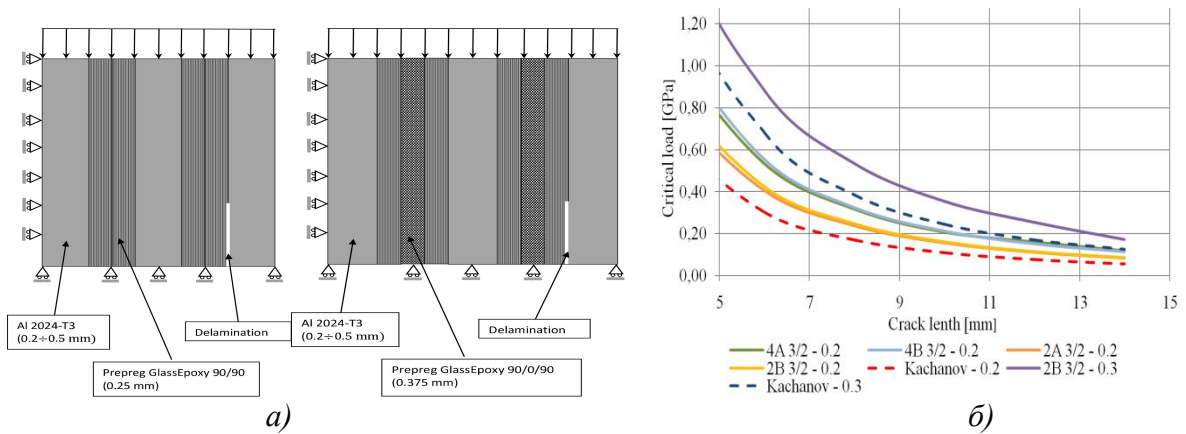


Рис. 1

Розглянуто композитний ламінат GLARE з наступними пружними характеристиками: транстронний склопластик – $E_1 = 53980$ МПа, $E_2 = E_3 = 9412$ МПа, $G_{12} = G_{13} = 5548$ МПа, $G_{23} = 3000$ МПа, $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0,33$, ізотропний алюміній – $E = 27744$ МПа, $\nu = 0,33$. Довжина a розшарування змінювалась у межах $2 \div 14$ мм. Товщина шару алюмінію h – у межах $0,2 \div 0,5$ мм. Відповідно до застосування підходу *Beam Approximation* a і h – це довжина і товщина алюмінієвої пластини, яка відокремлена тріщиною і вільною поверхнею шару алюмінію. Критичне навантаження розраховувалось за формулою [1] $P_{cr} = (\pi^2 E) / (3(1 - \nu^2)) (h/a)^2$. Результати чисельного розв'язку представлені на рис.1, б.

На графіку наведено залежність критичних навантажень P_{cr} , які відповідають локальній втраті стійкості матеріалу в околі приповерхневої тріщини, від значень a в діапазоні $5 \div 14$ мм для значень $h = 0,2$ мм та $h = 0,3$ мм. Криві аналітичного розв'язку позначено як "Kachanov - значення h ". Для аналізу результатів застосовується параметр $\beta = h/a$. Аналіз отриманих даних дозволяє зробити наступні висновки.

Критичне навантаження істотно залежить від відносної довжини розшарування $\beta = h/a$: при $\beta < 0,01$ розбіжність між 3D і балковою моделями не перевищує 5%, тоді як для коротких розшарувань сягає 30%. Зі збільшенням товщини алюмінієвого шару P_{cr} зростає, проте балкова модель переоцінює жорсткість. Перехід від GLARE-2 до GLARE-4 (збільшується товщина системи) супроводжується підвищенням стійкості, тоді як вплив орієнтації волокон (2A→2B, 4A→4B) є незначним. Балковий підхід придатний для орієнтовних інженерних оцінок при малих β , але точний аналіз потребує тривимірної постановки.

1. *Kachanov, L. M.* Delamination Buckling of Composite Materials. Dordrecht: Springer, 1988. 144 p. (Mechanics of Elastic Stability; vol. 14).
2. *Remmers, J. J. C., de Borst, R.* Numerical modelling: delamination buckling: ch. 18 // Vlot A., Gunnink J. W. Fibre Metal Laminates, an Introduction. Kluwer Academic Publishers, 2001. P. 281–297.
3. *Guz, A. N.* Fundamentals of the Three-Dimensional Theory of Stability of Deformable Bodies. Berlin: Springer-Verlag Heilberg, 1999. 555 p.
4. *Коханенко, Ю. В., Быстров, В. М.* Построение дискретных моделей на основе базовых факторов // Механика композитов: В 12-и т. Т. 11. Численные методы / Я. М. Григоренко, Ю. В. Шевченко, А. Т. Василенко [и др.]; под общ. ред. А. Н. Гузя. Киев: А.С.К., 2002. С. 135–187.

ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ ТА ДИСИПАТИВНИЙ РОЗІГРІВ ПРОСТОРОВОЇ ШАРУВАТОЇ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОЇ В'ЯЗКОПРУЖНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПАНЕЛІ З ЗАЛЕЖНИМИ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

В.І.Козлов, Л.П.Зінчук, Ю.І.Лелюх

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

Широке використання у різноманітних технічних пристроях конструктивних елементів з в'язкопружних п'єзоелектричних матеріалів зумовлює актуальність дослідження їх динамічної поведінки з урахуванням зв'язаності фізико-механічних полів, особливо при критичних режимах роботи, таких як резонансні коливання. Властиві в'язкопружним матеріалам гістерезисні втрати, внаслідок яких електромеханічна енергія перетворюється на теплову, призводять до дисипативного розігріву, що має істотний вплив на механічний та тепловий стан конструкцій – розподіл напружень і деформацій, амплітудно-частотну залежність електромеханічних характеристик тощо. Особливо важливу роль дисипативний розігрів відіграє при резонансних коливаннях, що призводить до необхідності враховувати залежність фізико-механічними властивостей матеріалу від температури.

У роботі представлено чисельну методику розв'язання нелінійних крайових задач про коливання та дисипативний розігрів просторових тіл обертання із в'язкопружних п'єзоелектричних матеріалів, яка ґрунтується на методі скінченних елементів у варіаційній постановці. Використано ітераційний метод покрокового інтегрування за часом, що зводить вихідну нелінійну задачу до послідовності лінійних задач електропружності з комплексними фізико-механічними характеристиками, які залежать від температури

$$\delta \Pi = 0, \quad \Pi = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} - D_i E_i - \rho \omega^2 u_k u_k) dV - \int_S (p_{nk} u_k - q^e \varphi) dS$$

та теплопровідності з відомим джерелом тепла [1]

$$\delta I = 0, \quad I = \frac{1}{2} \int_V \lambda_{ij} T_{,i} T_{,j} + c \rho \frac{dT}{dt} T - 2F^D T dV - \int_S \alpha_T (T - 2T_c) T dS.$$

Було проведено чисельне моделювання термоелектромеханічної поведінки тришарової шарнірно опертої по периметру циліндричної панелі з радіусом серединної поверхні 0,1 м, товщиною 0,01 м та довжиною 0,1 м. Центральний кут панелі – $\alpha = \pi/3$. Приповерхневі шари панелі виготовлено із п'єзокераміки PZT (EC-65) з радіальною поляризацією, кожний товщиною 0,0025 м, середній пасивний шар представлений алюмінієм. На рис. 1 відображено контурний графік розподілу температури $T, ^\circ\text{C}$ на 6-ій хвилині дисипативного розігріву за механічного навантаження гармонічним тиском з амплітудою $P_0 = 1,5 \cdot 10^4$ Па на частоті першого резонансу $\omega_1 = 0,25192 \cdot 10^5$ рад/с ($\tilde{\omega} = \omega \cdot 10^{-5}$ рад/с). Вважалось, що на зовнішніх електродованих поверхнях п'єзошарів та у металевому шарі задано нульовий потенціал. Розрахунки проводились при сталих фізико-механічних параметрах п'єзоактивного матеріалу та коефіцієнті тепловіддачі між зовнішнім середовищем і панеллю $\alpha_T = 20$ Вт/(м² °C). На рис. 2 показано частотний розподіл максимальної температури дисипативного розігріву T_{\max} циліндричної панелі в околі першого резонансу для випадку механічного навантаження

з амплітудою $P_0 = 1,5 \cdot 10^4$ Па. Штриховою кривою позначено розв'язок задачі зі сталими фізико-механічними параметрами, суцільна крива відповідає квадратичним залежностям параметрів п'єзоактивного матеріалу від температури, які представлено в [1].

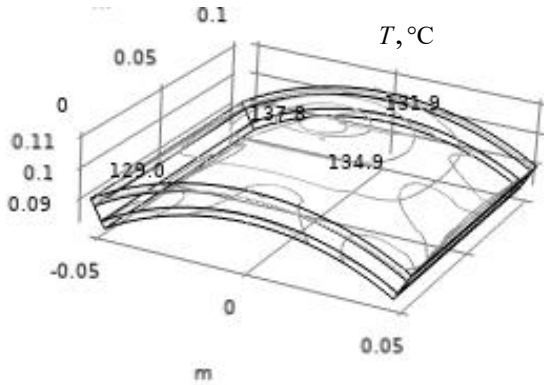


Рис. 1

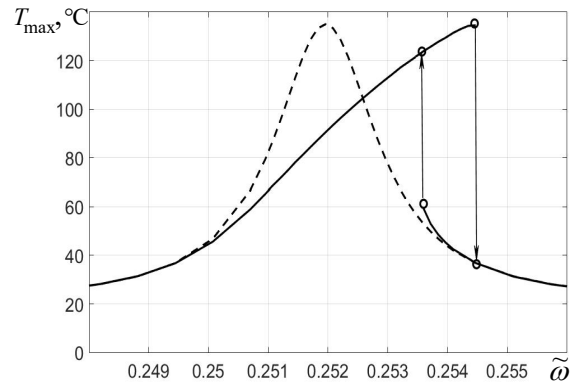


Рис. 2

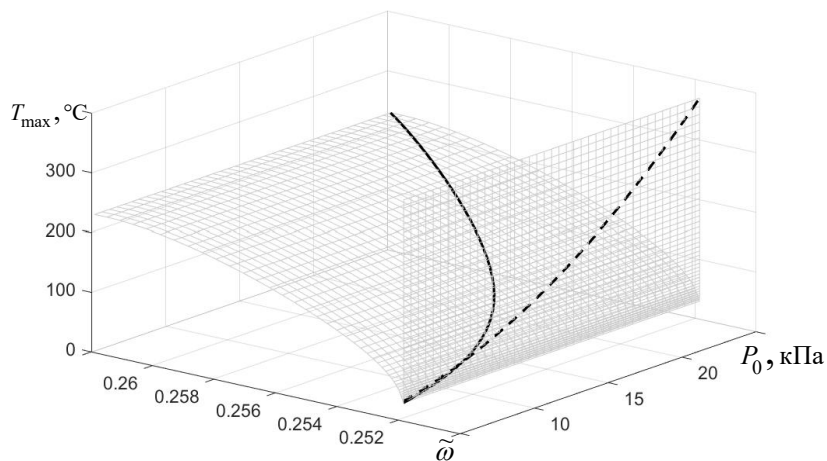


Рис. 3

Рис. 3 демонструє розподіл максимальної температури T_{\max} на 6-ій хвилині дисипативного розігріву відносно амплітуди механічного навантаження P_0 та частоти $\tilde{\omega}$. Отримані криві показують, що врахування залежності фізико-механічних властивостей матеріалу від температури призводить не тільки до кількісної, а й якісної відмінності результатів і дозволяє виявити суттєво нелінійний характер поведінки температури дисипативного розігріву.

1. Karnaukhov V.G., Kozlov V.I., Zavgorodnii A.V. et al. Forced Resonant Vibrations and Self-Heating of Solids of Revolution Made of a Viscoelastic Piezoelectric Material // Int. Appl. Mech. – 2015. – **51**, No. 6. – P. 614–622.

ALGORITHM FOR NUMERICAL STUDY OF THE AXISYMMETRIC ELASTOPLASTIC STATE OF THIN SHELLS MADE OF FUNCTIONALLY-GRADIENT MATERIALS

M.O.Babeshko, V.G.Savchenko

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

An algorithm for determining the axisymmetric elastic-plastic stress-strain state of shell elements of structures made of functionally gradient material in the processes of force loading is proposed. As determining equations, we use equations of the theory of small curvature processes, linearized by the method of additional stresses. The characteristics of a functionally-gradient material are determined depending on the volume content of the constituent materials.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE NUMBER AND ARRANGEMENT OF ELLIPTICAL INCLUSIONS ON STRESS CONCENTRATION IN A CYLINDRICAL SHELL WITH A CIRCULAR HOLE

E. L. Hart, O. D. Shebanov

Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine

Thin-walled structural elements such as shells and plates are widely used in aviation, astronautics, energy, civil engineering, construction, and other industries. Design and technological requirements often result in the appearance of structural inhomogeneities in the form of holes and inclusions, which inevitably disrupt the material's continuity. Such inhomogeneities lead to stress concentrations and influence the deformation and failure processes of the system. Therefore, accounting for the influence of local stress concentrators and finding ways to reduce stress concentrations in thin-walled structures remain important problems in solid mechanics [1–3]. Numerical methods, particularly the finite element method, provide effective tools for solving such problems.

This paper presents computer modeling of the stress-strain state of a thin-walled cylindrical shell containing a small circular hole surrounded by several elliptical inclusions made of materials with different mechanical properties. Three configurations of two and four elliptical inclusions relative to the hole are considered: vertical, horizontal, and at a 45-degree angle. A finite element analysis was conducted to evaluate the effect of the distance between the hole and the inclusions, their spatial arrangement, and material properties on the stress concentration factor (SCF). The results were compared with corresponding data for plates.

Analysis of the conducted studies shows that, of the considered options for the number and arrangement of inclusions, the use of two horizontally positioned hard inclusions proved to be the most effective. For inclusions harder than the shell material, a horizontal arrangement reduces the SCF by approximately 36 %, while for softer inclusions, a vertical arrangement reduces the SCF by approximately 20 %. When the inclusions are positioned at a 45-degree angle, the SCF decreases slightly, by 10 %.

We noted that decreasing the distance between the hole and the inclusions leads to a decrease in stress concentration, with the most favorable configuration observed with the minimum distance for horizontally positioned hard inclusions. It should be noted that during the research a mechanical effect was revealed: when approaching the hole of two hard

diagonal inclusions, the location of the stress concentration zones changes in the direction opposite to the location of the inclusions.

References

1. *Gudramovich V. S., Gart É. L., Strunin K. A.* Modeling of the behavior of plane-deformable elastic media with elongated elliptic and rectangular inclusions // *Materials Science*. – 2017. – Vol. 52, No. 6. – P. 768–774. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0020-z>
2. *Hart E. L., Hudramovich V. S.* Projection-iterative schemes for the realization of the finite element method in problems of deformation of plates with holes and inclusions // *Journal of Mathematical Sciences*. – 2014. – Vol. 203. – No. 1. – P. 55–69. <https://doi.org/10.1007/s10958-014-2090-x>
3. *Hudramovich V. S., Hart E. L., Terokhin B. I.* 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. – Vol. 204. – Chapter 18. – P. 249–264. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54063-9_18

КЕРУВАННЯ АМПЛІТУДОЮ ВИМУШЕНИХ КОЛИВАНЬ ТРИШАРОВОЇ В'ЯЗКОЕЛЕКТРОПРУЖНОЇ КОНІЧНОЇ ПАНЕЛІ В РЕЖИМІ П'ЄЗОАКТУАТОРА

Карнаухов В.Г., Лелюх Ю.І., Козлов В.І., Зінчук Л.П.

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

Серед існуючих п'єзоперетворювачів розповсюдженими є шаруваті тіла, утворені з металевих і поляризованих по товщині електропружних шарів. У багатьох випадках їх основним режимом роботи є режим гармонічних коливань з частотами близькими до резонансних, що для в'язкопружних матеріалів призводить до значного зростання температури внаслідок дисипативного розігріву. Це може суттєво вплинути на працездатність елементів конструкцій з п'єзоактивних матеріалів внаслідок температурних напружень, залежності від температури фізико-механічних характеристик тощо. Останнім часом набувають актуальності задачі, в яких розвиваються підходи і методи керування деформованим станом механічно навантажених елементів конструкцій з використанням п'єзоелементів [1]. Подібний підхід дозволяє не тільки обмежити рівень напружень в елементах, але і рівень дисипативного розігріву в'язкопружного матеріалу самих п'єзоактуаторів.

У роботі використано скінченно-елементну методику розв'язання нелінійних крайових задач про коливання та дисипативний розігрів просторових тіл обертання із в'язкопружних п'єзоелектричних матеріалів. На кожному кроці по часу вихідна нелінійна задача зводилась до розв'язку в ітераційному процесі послідовності лінійних задач електропружності у варіаційній постановці з комплексними фізико-механічними характеристиками, які залежать від температури та теплопровідності з відомим джерелом тепла, представленим дисипативною функцією [1, 2].

Було проведено чисельне моделювання термоелектромеханічної поведінки тришарової шарнірно закріпленої по контуру конічної панелі, у якій кут конусності $\theta_0 = \pi/4$, початковий радіус серединної поверхні 0,1 м, довжина ребра 0,1 м, а

центральный кут $\alpha = \pi/3$. Зовнішні шари панелі товщиною 0,0025 м виготовлено з поляризованої по товщині п'єзокераміки PZT (EC-65), а внутрішній металевий шар товщиною 0,005 м – з алюмінію. Зауважимо, що подібна конструкція п'єзокерамічного триморфу дозволяє реалізувати досить просту схему зворотного зв'язку для активного демпфування вимушених коливань. Так, при перевищенні амплітудою зміщення заданого наперед значення для їх демпфування достатньо прикласти до внутрішнього металевому шару компенсуючий потенціал.

На рис.1 для випадку сталих фізико-механічних параметрів п'єзоактивного матеріалу представлено ізоповерхні амплітуди товщинного зміщення на частоті першого резонансу $\omega_1 = 0,19433 \cdot 10^5$ рад/с при механічному навантаженні панелі по нижній поверхні гармонічним тиском з амплітудою $P_0 = 1,8 \cdot 10^4$ Па, при цьому на зовнішніх електродованих поверхнях п'єзошарів та у металевому шарі було задано нульовий потенціал. На рис. 2 наведено аналогічний розподіл ізоповерхонь, але за умови активного демпфування коливань, коли до внутрішнього металевому шару прикладено потенціал 60В, що призводить до зниження максимальної амплітуди товщинного зміщення у три рази. Рис. 3, 4 ілюструють розподіл температури дисипативного розігріву та модуля комплексного товщинного зміщення $|w|$ за частотою $\tilde{\omega} = \omega \cdot 10^{-5}$ рад/с для обраної контрольної точки, яка розташована на перетині верхньої поверхні та площини симетрії на відстані 0,05 м від краю панелі. За контрольне значення модуля зміщення $|w|$ обрано $5 \cdot 10^{-5}$ м. На рис. 3, 4 штриховою кривою позначено розв'язок задачі зі сталими фізико-механічними параметрами, суцільна крива відповідає квадратичним залежностям параметрів п'єзоелектричного матеріалу від температури, які представлено в [2]. Крива 1 відповідає випадку недемпфованих коливань, а крива 2 – випадку активного демпфування вимушених коливань заданим на внутрішньому металевому шарі потенціалом з амплітудою 60В. Точки *on* та *off* позначають початок та кінець активної фази демпфування, а точки I та II – стрибок розв'язку, що ілюструє суттєво нелінійний характер поведінки п'єзоактивного матеріалу у випадку залежності його фізико-механічних властивостей від температури.

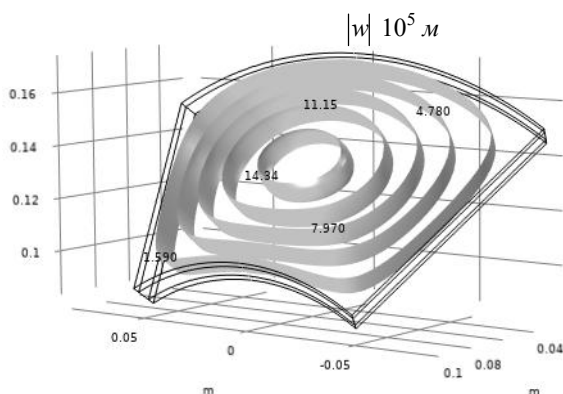


Рис.1

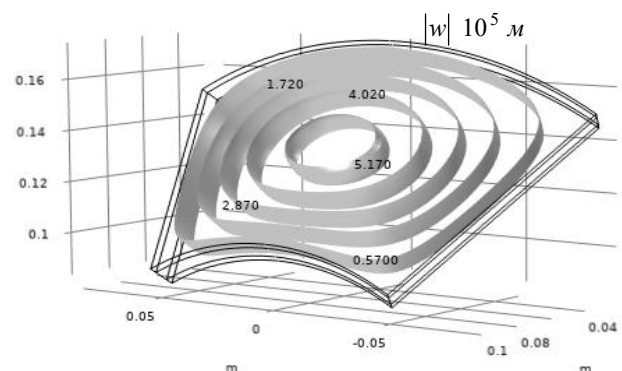


Рис. 2

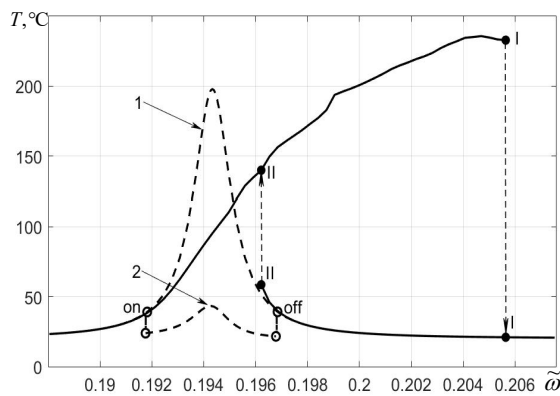


Рис.3

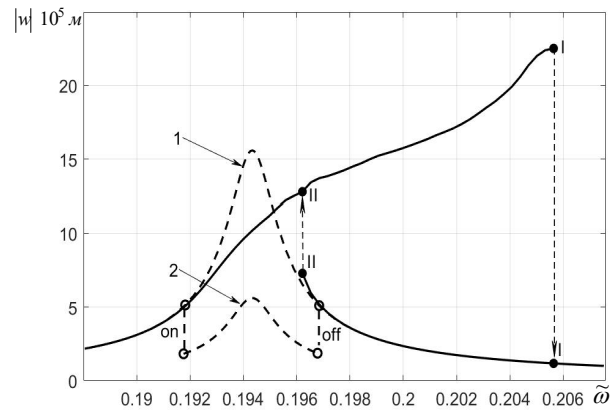


Рис. 4

Як впливає з графіків, введення найпростішого випадку зворотного зв'язку для демпфування вимушених коливань дозволяє підтримувати механічний та температурний стан панелі близьким до недеформованого, коли напруження та температура дисипативного розігріву не досягають своїх критичних значень, що дозволяє при проектуванні подібних елементів конструкцій обійтись лінійною моделлю поведінки матеріалу і не зважати на властиві в'язкопружним матеріалам прояви нелінійної поведінки.

2. Karnaukhov V.G., Kyrychok I.F., Kozlov V.I. Thermomechanics of Inelastic Thin-Wall Structural Members with Piezoelectric Sensors and Actuators under Harmonic Loading (Review) // *Int. App. Mech.* – 2017. – Vol. 53, No 1. – P. 6–58.
3. Karnaukhov V.G., Kozlov V.I., Zavgorodnii A.V. et al. Forced Resonant Vibrations and Self-Heating of Solids of Revolution Made of a Viscoelastic Piezoelectric Material // *Int. Appl. Mech.* – 2015. – Vol. 51, No. 6. – P. 614–622.

SOLUTION OF TWO-DIMENSIONAL BOUNDARY-VALUE PROBLEMS IN PLASTICITY THEORY UNDER ARBITRARY COMPLEX LOADING

K. Panin, O. Koliada

Oles Honchar Dnipro National University

Algorithms for solving two-dimensional boundary-value problems in plasticity theory under arbitrary external loading processes are proposed. Plasticity theory that takes microdeformations into account (Novozhilov, Kadashevich, Chernyakov) is used to describe the behavior of materials. This differential-nonlinear version of plasticity theory belongs to the class of theories based on a microstructural approach. It was previously used in the study of inelastic deformation of polycrystalline metals. In theories of this type, uniform plastic deformations due to both the granular structure of the polycrystal and the nonuniform distribution of damage are taken into account approximately, representing the plastic strain tensor as the sum of individual plastic deformations, each of which corresponds to a yield surface and a system of internal forces. The presented approach is based on the assumption that the statistics of anisotropic crystals can be replaced by the statistics of isotropic particles with different yield strengths and a random field of microstresses and microstrains.

Problems of complex shear, plane strain, and plane stress are considered under arbitrary complex loading processes. They are based on the application of the finite element method and the constitutive relations of plasticity theory, which take microstrains into account. An important circumstance is taken into account, significantly simplifying calculations for deformation paths of dimension less than five. This circumstance is that in the case of complex shear, the deformation process is typically determined by two parameters, whereas in the case of plane strain and plane stress, it is determined by three. This allowed for a corresponding reduction in the multiplicity of integrals in the constitutive relations of the theory. For the case of active loading, a modification of the general algorithm is proposed, further simplifying the numerical calculations. In this case, the multiplicity of integrals in the constitutive relations can be further reduced by one. A modification of this algorithm is also proposed for the case of monotonic loading. Another feature of the proposed algorithms is that, due to the nonlinearity of the relations in plasticity theory, which takes microstrains into account, determining the region of active microplastic deformation directions at each loading step requires an iterative process similar to the simple iteration method.

Complex shear and plane strain problems for a square bar weakened by either a circular hole or an edge crack are considered, as well as plane stress problems for a square plate weakened by either a circular hole or an edge crack. When calculating the stress-strain state, external loading schemes are used, leading to complex loading processes within the bodies under consideration. In each problem, the influence of the loading history on the stress-strain state parameters, in particular, the shape and size of the plastic zone, is investigated. It is shown that in some cases this influence can be significant. A comparison is made with results obtained within the framework of the deformation theory of plasticity and flow theory.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІСТОРИЇ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРУЖНОПЛАСТИЧНУ ПОВЕДІНКУ КОНТАКТНОЇ ПОВЕРХНІ ДВОШАРОВОГО ТІЛА

С.О. Чернецький, Є.О. Коваленко

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглядається задача визначення еластопружного стану двошарового пакету кінцевих розмірів під дією абсолютно жорсткого прямокутного штампу для різних траєкторій навантаження і умов контакту між шарами із урахування сил тертя (рис.1). Штамп є жорстко зчепленим із верхнім шаром полоси, а його переміщення описуються вектором $\vec{\Delta}(\Delta_x, \Delta_y)$, де Δ_x – горизонтальний зсув штаму, а Δ_y – його вертикальна осадка.

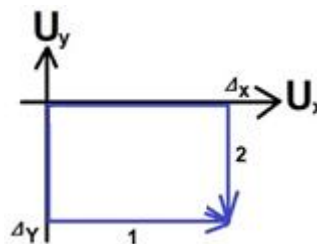


Рис.1. Траєкторії навантаження

За допомогою методу варіаційних нерівностей в роботах [1, 2] показано, що в цьому випадку задача еквівалентна квазіваріаційної нерівності, яку можливо звести до

послідовності задач мінімізації нелінійних функціоналів на кожному кроці зміни зовнішнього навантаження на множині, переміщень, задовольняючих граничним умовам. Дискретизація варіаційних задач здійснюється методом скінчених елементів. Фізичні співвідношення між напруженнями та деформаціями – теорія плинності з лінійним трансляційним зміцненням [3].

Отримані і порівняні результати для осадки штампу $\Delta_y = -0.0015 M$ та горизонтального його зсуву на $\Delta_x = 0.001 M$ по другій і першій траєкторіях навантаження при умові ковзання з можливим розшаруванням з урахуванням тертя для обох траєкторій.

Обрані матеріали шарів тіла:

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

нижнього: нержавіюча сталь марки AISI 201: $E_2 = 1.93 \times 10^5 \text{ МПа}$
 $\nu_2 = 0.27$; $\sigma_{s2} = 275.8 \text{ МПа}$; тангенційний модуль $E_{t2} = 2 \times 10^4 \text{ МПа}$.

Коефіцієнти тертя між шарами полоси $f = 0.15$.

На рис. 2 а, b наведено графіки нормального напруження σ_y вздовж верхньої межі нижнього шару тіла при розрахунку по першій і другій траєкторіях з урахуванням впливу сил тертя. На рис. 2 с, d наведено графіки статусу контакту шарів тіла для обох траєкторій (Рис.2 с,b). Статус контакту надається наступним чином: на осі ординат значення від 1 до 3 позначають 1 – відставання; 2 – контакт з проковзування; 3 – зчеплення; по осі абсцис відкладається відстань від лівого до правого краю тіла.

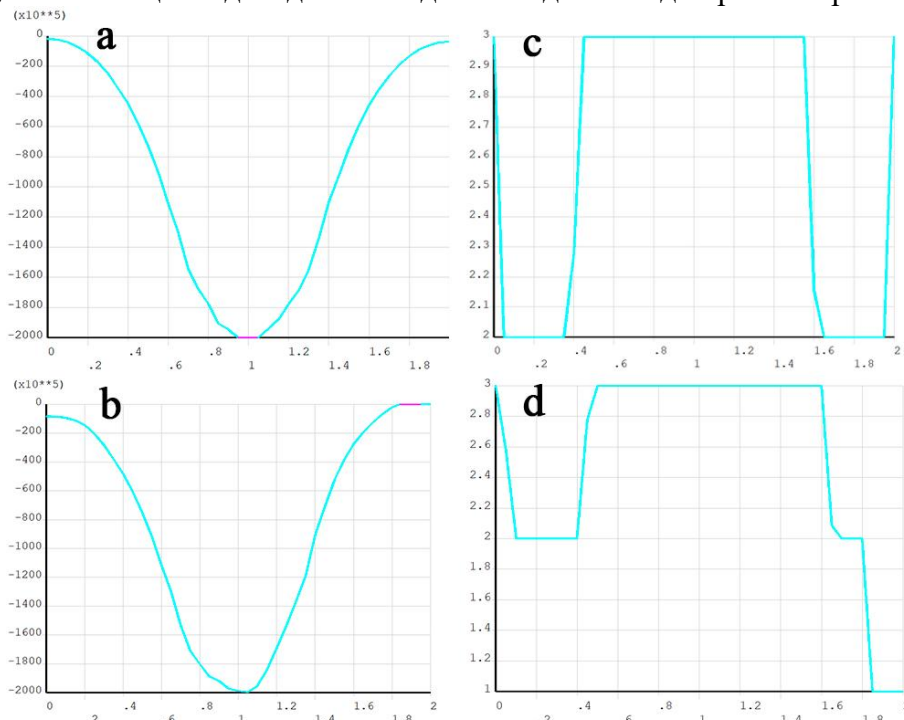


Рис.2. Графіки напружень σ_y і статусу контакту між шарами де:

а) σ_y по верхній границі нижнього шару - перша траєкторія;

б) σ_y по верхній границі нижнього шару - друга траєкторія ; с) - статус контакту між шарами тіла - перша траєкторія; d) - статус контакту між шарами тіла - друга траєкторія

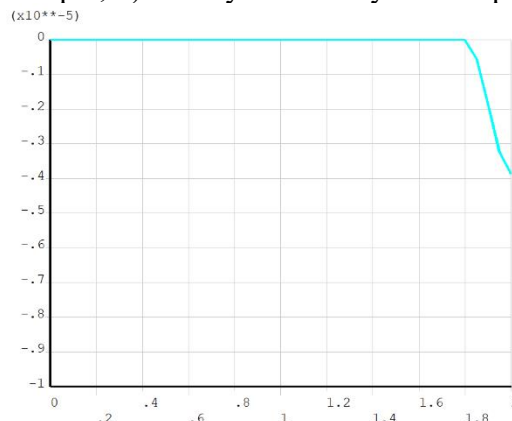


Рис.3. Графік відстані між верхнім і нижнім шаром тіла при розрахунку по другій траєкторії навантаження

Список літератури

1. Чернецький С.О., Швайко М.Ю. Вариційні принципи і математичні методи вирішення граничних задач для кусково-однорідних нелінійних середовищ //Мат. методи та фіз.-мех. поля. –1988. – Вип. 27.- С. 64-67.
2. Чернецкий С.А. Вариационная постановка термоупругопластических задач для слоистых тел при наличии трения //Вопросы прочности и пластичности. Днепропетровск: ДГУ, 1989. - С.43-49
3. Писаренко Г.С., Можаровський М.С. Рівняння та крайові задачі теорії пластичності і повзучості / К.: Наукова думка, 1989. – 493 с.

ВИЗНАЧАЛЬНІ СПІВВІДНОШЕННЯ ПОВЗУЧОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ

С.М. Склепус

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна
snsklepus@ukr.net

В останні десятиліття з'явилося нове покоління композитних матеріалів – функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ), для яких характерна відсутність чітких меж між компонентами і безперервна просторова зміна (градієнт) фізико-механічних властивостей. Концепція створення ФГМ вперше була запропонована у 1984 р. в Японії при розробці теплоізоляційних покриттів для багаторазових космічних апаратів. Завдяки високим показникам міцності та термостійкості метало-керамічні ФГМ використовуються в енергетиці, космічній техніці, хімічній промисловості, конструкціях, що працюють в екстремальних умовах при значних термомеханічних навантаженнях. Процеси нелінійного деформування ФГМ залежать від просторової зміни властивостей матеріалу. Це одна з найбільш складних областей механіки, оскільки властивості матеріалу змінюються безперервно по координаті і класичні моделі для однорідних матеріалів тут не можуть бути застосовані. Механічна поведінка ФГМ є складнішою, ніж у звичайних композитів. Тому теорії повзучості ФГМ є менш розробленими порівняно із теоріями для однорідних або кусково-однорідних матеріалів.

Для моделювання повзучості та ефективних властивостей ізотропного ФГМ застосовувалася скалярна версія самоузгодженої моделі (Self-Consistent Model, SCM), яка широко використовується на практиці, при дослідженні композитних матеріалів. Запропоновано загальні моделі деформування ФГМ при одновісному розтягу, стиску, чистому крученні та складному напруженому стані, що враховують повзучість у металевій та керамічній фазах. Розроблено визначальні співвідношення для випадку, коли матриця композиту в умовах високотемпературної повзучості виявляє залежність характеристик від виду навантаження, а армуючі керамічні частинки деформуються пружно. Запропоновані співвідношення у рамках єдиного підходу описують всі три стадії повзучості та такі ефекти деформування: різноопірність розтягу/стиску, незалежне протікання деформування в умовах чистого кручення, вплив гідростатичного тиску, непружна стисливість, ефект Пойнтінга, різний розвиток пошкоджуваності при розтягу, стиску та чистому крученні. Як скалярний параметр стану, що описує зміцнення та пошкоджуваність матеріалу, використано величину розсіяної в процесі повзучості енергії. Розроблено методику визначення параметрів матеріалу, що входять у визначальні співвідношення.

Експериментальні дані для нелінійного деформування ФГМ (діаграми деформування, криві повзучості) у відкритому доступі відсутні. Це можна пояснити складністю виготовлення та тестування градієнтних структур. При цьому, є достатньо велика кількість робіт, що містять експериментальні дані для однорідних (з постійним вмістом керамічних частинок) метало-матричних композитів (ММК). Майже всі роботи по моделюванню нелінійної поведінки ФГМ використовують наявні дані для однорідних ММК. У цій роботі для перевірки побудованих визначальних співвідношень було виконано співставлення з експериментальними даними для другої стадії повзучості метало-матричних композитів (Al-SiC, Al6061-Al₂O₃) з різним об'ємним вмістом армуючих частинок. Отримано задовільний збіг теоретичних та експериментальних даних для швидкостей деформацій повзучості.

АНАЛІЗ РОЗРАХУНКОВИХ ВЕЛИЧИН ФЛАТЕРА ПОДАТЛИВИХ ДО ТРАНСВЕРСАЛЬНОГО ЗСУВУ ПЛАСТИН-СМУГ ЗА РІЗНИХ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ

В.О. Боднар¹, В.С. Пакош^{1,2}, В.В. Бабуров³

¹*ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів*

²*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів*

³*ДП "КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля", м. Дніпро*

При проектуванні сучасних відповідальних конструкцій різноманітного цільового призначення домінують дві тенденції: максимальне по можливості зниження матеріаломісткості та забезпечення необхідного рівня надійності. Це зумовило широке застосування тонкостінних елементів з композитних матеріалів, зокрема армованих з полімерною матрицею. Основною відмінністю таких матеріалів від традиційних однорідних ізотропних є їхня податливість до деформацій трансверсального зсуву.

Пластинчасті елементи – одні з важливих складників навантажених конструкцій в аерокосмічній галузі [3]. Їхня механічна поведінка за дії експлуатаційних, особливо динамічних, навантажень часто відіграє вирішальну роль у збереженні цілісності та функціональної придатності таких об'єктів. Зокрема, це стосується ситуацій, коли елемент перебуває в аеродинамічному потоці газу.

За певних швидкостей потоку та значень геометричних і фізико-механічних характеристик у пластині можуть виникнути самозбуджувальні коливання із наростаючою амплітудою, що може спричинити руйнування як пластини, так і конструкції. Таке явище прийнято називати флатером.

Розглянута побудована раніше на основі варіанту уточненої теорії пластин [2] математична модель поведінки податливої до трансверсального зсуву пластини-смуги за дії аеродинамічного потоку. Її основу становить розв'язувальне диференціальне рівняння відносно динамічного прогину w [1]. Суттєвою відмінністю цього рівняння від класичного [3] є наявність у його структурі мішаних похідних та похідної третього порядку w''' , що значно ускладнює процедуру отримання його розв'язку. Відповідне характеристичне рівняння, на відміну від класичної теорії пластин, є повним поліномом четвертого порядку. Запропоновано та програмно реалізовано алгоритм відшукування його коренів за відомої критичної частоти флатера. Продемонстровано використання алгоритму за конкретних значень фізико-механічних та геометричних параметрів пластини-смуги за вільного шарнірного опирання нижніх ребер видовжених граней.

У випадку невідомої критичної частоти флатера для її відшукування з крайових умов отримане трансцендентне рівняння. Розроблено та програмно реалізовано чисельний алгоритм відшукування його коренів у формі $\Omega = \delta + i\omega$, де δ – коефіцієнт демпфування, а ω – частота коливань описаної вище пластини-смуги. Встановлено, що досліджувана система має стабільну поведінку за дозвукowego та трансзвукowego режимів обтікання. За гіперзвукowego режиму існує вузький діапазон нестабільності 1326-1367 м/с (лише 41 м/с). У надгіперзвуковому режимі система повертається до стабільного режиму.

1. Боднар В.О., Марчук М.В., Пакош В.С. Характеристичне рівняння математичної моделі флаттера податливої до трансверсального зсуву пластини-смуги та алгоритм його розв'язання. // Прикл. проблеми механіки і математики. – 2024. – Вип. 22. – С. 69–74.
2. Осадчук В. А., Марчук М. В. Математична модель динамічного деформування податливих до зсуву та стиску композитних пластин // Прикл. проблеми механіки і математики. – 2005. – Вип. 3. – С. 43–50.
3. Ventsel E., Krauthammer T., Thin Plates and Shells: Theory, Analysis, and Applications, (CRC Press, 2001).



Доповіді секції: Іноваційні технології в машинобудуванні, металургії, геотехнічній механіці, будівництві та освіті (13 листопада 2025)

Секційні доповіді (12³⁰-17³⁰)

1(26). D. V. Hryshchak, V. Z. Gristchak, N. M. Dyachenko, V. O. Kuprikov APPLICATION OF COMPUTER ALGEBRA SYSTEMS TO THE ANALYSIS OF THE BIFURCATION STATE OF ECCENTRICALLY SUPPORTED COMPOSITE SHELL STRUCTURES OF THE “CONE–CYLINDER” TYPE	59
2(36) О. В. Швець, Д. В. Коноводов, О. Д. Петров, Т. Є. Лісничка ОСОБЛИВОСТІ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРОМКОВША МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ КРУГЛОЇ ЗАГОТОВКИ	61
3(37) І. О. Лісова, Т. М. Рудянова ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ РИЗИКІВ У СФЕРІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ	62
4(27). M.O.Babeshko, V.G.Savchenko NUMERICAL STUDY OF AXISYMMETRIC DEFORMATION PROCESSES OF LAYERED BODIES AND SHELLS TAKING INTO ACCOUNT COMPLEX MATERIAL PROPERTIES	64
5(5). М. Ф. Мормуль, О. М. Щитов, Д. М. Щитов ВЕКТОРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ E-COMMERCE	64
6(33). Карпенко І.О., Давидчик О.М. РОЛЬ ПЕДАГОГА В УСПІШНІЙ АДАПТАЦІЇ СТУДЕНТІВ НОВОГО НАБОРУ ДО УМОВ КОЛЕДЖУ	67
7(21). Волосова Н.М., Гноєвой Д.В. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ МАРКЕТИНГОВОЇ СТРАТЕГІЇ РОЗВИТКУ ГОТЕЛЮ	69
8(22). Худа Ж.В., Тонконог Є.А. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИКЛАДАННІ ВИЩОЇ ТА ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ СТУДЕНТАМ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ	70
9(24).Т.В. Крилова, П.О. Стеблянко ДО ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ІЗ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ	73
10(12). О.Р. Krukovskyi, S.A. Kurnosov, Y.Y. Bulich, V.O. Khvorostian RISK MANAGEMENT OF STABILITY LOSS IN MAIN ROADWAYS DRIVEN THROUGH THE GOAF OF A DESTRESSING LONGWALL	73
11(13). О.Р. Krukovskyi, V.V. Krukovska HYDRO-MECHANICAL RISKS ASSOCIATED WITH DELAYED SUPPORT INSTALLATION IN TUNNELS EXCAVATED THROUGH FRACTURED ROCK	74
12(14). V.V. Krukovska, A.O. Kostrytsia EFFECT OF LITHOLOGICAL COMPOSITION ON STRESS RELIEF IN THE COAL SEAM FLOOR UNDER MECHANIZED LONGWALL SUPPORT	74
13(15). D.O. Krukovskyi TWO-DIMENSIONAL BLAST-WAVE SIMULATION IN AN IDEAL GAS VIA FEM (abs)	75
14(30). Steblyanko P. MODELING OF NONLINEAR DEFORMATION OF SOME FUNCTIONAL-GRADIENT MATERIALS	75
15(48). Y.O. Vynohradov THE INFLUENCE OF AGGRESSIVE GROUNDWATER ON METAL SUPPORT IN MINE WORKINGS	76

16(4). М.Ф.Мормуль, Л. А.Романчук, Д. М.Щитов, М. М.Шевченко, Є. П. Єфімова ОПТИМІЗАЦІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИКЛАДАННЯ ТОЧНИХ ДИСЦИПЛІН В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ	76
17(49). А.О. Молчанов ВІДНОВЛЕННЯ ПОТЕНЦІАЛЬНОГО 2D ПОЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОТЕНЦІАЛІВ ПОДВІЙНОГО ШАРУ З В-СПЛАЙНОВОЮ ФУНКЦІЄЮ ЩІЛЬНОСТІ	79
18(51). А.П. Коваленко О.М. Давидчик ІНОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В АВТОМОБІЛЕБУДУВАННІ	80
19(52). Я.В. Гусаревич ДВОСТОРОННІЙ АПОСТЕРІОРНИЙ ОЦІНЮВАЧ ПОХИБКИ НЕЙМАНА-ДІРІХЛЕ АПРОКСИМАЦІЙ МЕТОДУ α -FEM	82
20(43). Сохацький А.В. ДО ПИТАННЯ СТВОРЕННЯ ДРОНІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ВИСОКОЮ АЕРОДИНАМІЧНОЮ ЯКІСТЮ	83
21(32). Давидчик О.М., Карпенко І.О., Коваленко А.П. ДЕЯКІ СПІВВІДНОШЕННЯ ДЛЯ ОПЕРАТОРА ДЖЕКСОНА	84
22(60). Круковський О.П., Ларіонов Г.І., Земляна Ю. В. ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ПОСЛІДОВНОЇ АПРОКСИМАЦІЇ ДО ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЗУСИЛЬ ВЗДОВЖ АНКЕРУ З ВРАХУВАННЯ ГЛИБИНИ РОЗТАШУВАННЯ ВИРОБКИ	85
23(62). M. Altoumaimi, V. Loboda AN INTERFACE CRACK WITH A LIMITED ELECTRIC PERMEABILITY IN 1D PIEZOELECTRIC QUASICRYSTAL	87

APPLICATION OF COMPUTER ALGEBRA SYSTEMS TO THE ANALYSIS OF THE BIFURCATION STATE OF ECCENTRICALLY SUPPORTED COMPOSITE SHELL STRUCTURES OF THE “CONE–CYLINDER” TYPE

D. V. Hryshchak⁽¹⁾, V. Z. Gristchak⁽²⁾, N. M. Dyachenko⁽³⁾, V. O. Kuprikov⁽³⁾

*⁽¹⁾Design bureau "Pivdenne" named after M.K. Yangel, ⁽²⁾ NTU "Dnipro Polytechnic",
⁽³⁾Zaporizhzhia National University*

One of the ways to increase the load-bearing capacity, in particular the stability of thin-walled structures and systems of new technology, under combined external loading is to use composite reinforced shells with longitudinal and annular stiffeners [2-6]. Analytical derivation of solution equations for such structures, taking into account the discrete placement of intermediate and connecting frames and the effect of eccentricity of the location of reinforcing elements, is a rather cumbersome task. The use of computer algebra systems [1], in particular the Maple system, allows to automate this process to a certain extent.

In the work, the obtained differential equations are used for numerical analysis of the stability of reinforced composite structures to local and general forms of buckling by the finite difference method, which allows determining critical loads and provides the ability to visualize wave-forms in a supercritical state depending on the nature of the external static load based on the semi-moment theory of thin shells [4]. For calculations, one-sided and symmetrical reinforcements with equal bending stiffness relative to the median surface of the shell system were selected.

The figure 1 shows the boundary lines separating the stability regions of the composite “cone–cylinder” structure under axial forces and external pressure, taking into account the stiffness of the frames for bending in the plane of initial curvature and torsion.

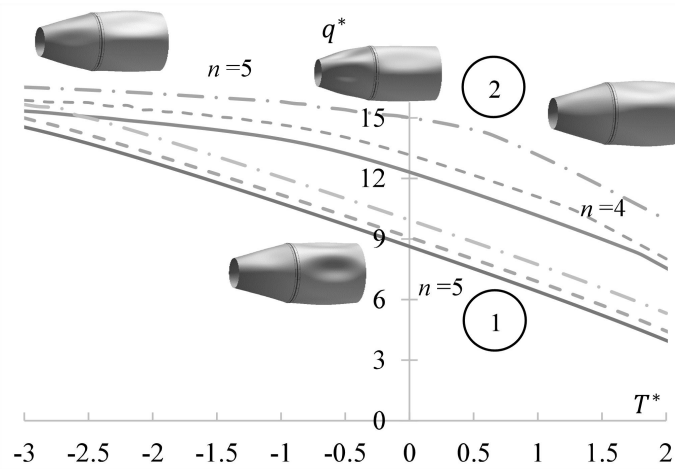
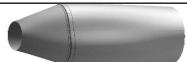






Figure 1. Boundary lines separating the stability regions of the composite “cone–cylinder” structure

The number of intermediate frames is selected in such a way as to ensure the equilibrium stability of the compartments (for lines 2). Solid lines correspond to the internal ribbing, dashed lines to the external, dash-dotted lines to the symmetrical one. As an example, a structure with the geometric parameter of a cylindrical compartment with internal reinforcement of 10 stringers on both compartments and 3 frames on the conical compartment is considered.

In the absence of axial force, the table shows the parameters of the transverse critical pressure, wave number and supercritical forms of the studied system.

Table 1.

	$G_1 = G_2 = 0$			$G_1 = 100, G_2 = 10$	$G_1 = 5000, G_2 = 10$
$k_{cyl.rings}$	20	50	90	90	90
					
q^*	2.1258	3.9524	5.4834	7.7754	8.7749
n	3	3	3	6	3

Numerical experiments show that for the studied class of composite shell systems, external ribbing provides higher stability compared to internal. Analysis of the bifurcation forms of the shell system confirms the dependence of the nature of wave formation on the type of ribbing and the stiffness of the reinforcing force elements. The use of the Maple computer algebra system allows you to automate the derivation of stability equations for composite reinforced shells, simplify analysis, and implement computer visualization of the bifurcation process.

The results obtained can be used to determine the rational parameters of reinforced composite structures of the “cone–cylinder” type and increase their stability under combined loading. The applied approach, combining analytical and numerical methods, can be integrated into computer-aided design systems to create structures and systems of new technology.

References

1. Hryshchak D. V. *Kompiuterna alhebra u rozviazanni prykladnykh zadach mekhaniky konstruksii zi zminnymy parametramy* [Computer algebra in solving applied problems of structural mechanics with variable parameters]: monograph. Kherson: Publishing house "Helvetica", 2020. 218 p. [in Ukrainian].
2. Degtyarev M. A., Shapoval A. V., Gusev V. V., Avramov K. V., Sirenko V. N. Structural optimization of waffle shell sections in launch vehicles. *Strength of Materials*. 2019. Vol. 51, No. 2. P. 223–230.
3. Gavrilenko G. D., Matsner V. I. Stability of reinforced cylindrical shells under combined loading. *Int. Appl. Mech*, 2011. Vol. 46. P. 1372–1376.
4. Gristchak V. Z., Hryshchak D. V., Dyachenko N. M., Sanin A. F., Sukhyi K. M. Bifurcation state and rational design of three-layer reinforced compound cone-cylinder shell structure under combined loading. *Space Science and Technology*. 2023. Vol. 29. No. 6 (145). P. 26–41.
5. Ifayefunmi O., Ruan D. Buckling of Stiffened Cone–Cylinder Structures Under Axial Compression. *Int. J. Appl. Mech.*, 2022. Vol. 14, No. 7. Id: 2250075.
6. Vol'mir A. S. *Stability of Elastic Systems* (translation). 1966. 1029 p.

ОСОБЛИВОСТІ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРОМКОВША МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ КРУГЛОЇ ЗАГОТОВКИ

О. В. Швець¹, Д. В. Коноводов¹, О. Д. Петров², Т. Є. Лісничка²

¹*Український державний університет науки і технологій*

²*ТОВ "ІНТЕРПАЙП УКРАЇНА"*

Числове моделювання методом кінцевих елементів здійснювалось за допомогою комерційного програмного забезпечення Thercast від компанії Transvalor (Франція).

У зв'язку з суттєвим підвищенням вимог до чистоти круглої безперервнолитої заготовки, що використовується для виробництва особливо відповідальних виробів (колес для залізничного транспорту, труб спеціального призначення), необхідні комплексні технологічні рішення щодо підвищення якості сталі, насамперед за рахунок зниження кількості та розміру неметалевих включень. При цьому проміжний ковш, як останній агрегат з вогнетривкою футеровкою, відіграє особливу роль завдяки видаленню включень шляхом оптимізації потоків рідкої сталі. Оскільки схема потоків металу в проміжному ковші є базовою складовою їх продуктивності, метою цього дослідження була оцінка та оптимізація гідродинаміки всередині чотириструмкового проміжного ковша шляхом комплексного підходу до зміни його внутрішньої геометрії. Для забезпечення оптимальних умов щодо видалення неметалевих включень, необхідно в першу чергу забезпечити довготривалий контакт металу зі шлаком як за рахунок направленості потоків металу до поверхні розподілу метал-шлак, так і за рахунок збільшення часу перебування металу в проміжному ковші.

Основна увага щодо регулювання потоку металу в об'ємі проміжного ковша історично приділяється конструктивним та технологічним особливостям металопріймачів у зоні надходження металу із сталювша для зниження турбулентних потоків. Тому в рамках проведених досліджень акцент був зроблений на оцінці змін потоків рідкої сталі в об'ємі промковша за рахунок використання інших додаткових «модифікаторів» потоків, таких як скімери та перегородки. Слід зауважити, що окрім

впливу на розподіл потоків, була проведена оцінка можливого впливу змін на запобігання надмірній ерозії вогнетривкої футеровки проміжного ковша. Результати фактичної оцінки наявності неметалевих включень у готових виробах показали суттєве зниження інтервалу наявних включень з початкових 50-100 мкм до 20-50 мкм зі стійкою тенденцією щодо зменшення кількості включень після впровадження змін.

Посилання

Швець О. В., Коноводов Д. В., Петров О. Д., Лісничка Т. Є. Вдосконалення конструкції промковша машини безперервного лиття круглої заготовки за допомогою чисельного моделювання. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 308-320.

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-308-320>

ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ РИЗИКІВ У СФЕРІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

І. О. Лісова, Т. М. Рудянова

Університет митної справи та фінансів

Штучний інтелект став частиною повсякденного життя людей за останні декілька років. Основною причиною, яка спонукає ним користуватися є необхідність спростити та пришвидшити виконання повсякденних та робочих задач. Для виконання різноманітних завдань та функцій штучний інтелект потребує навчання. Цей процес базується на машинному навчанні, яке на основі великих обсягів даних навчає та дозволяє приймати рішення, робити прогнози. McKinsey виявив, що майже 60% організацій використовують цей інструмент принаймні в одній бізнес-функції [1].

Машинне навчання є сферою, яка ґрунтується на використанні даних та алгоритмів, що дозволяє штучному інтелекту імітувати спосіб навчання людей, який полягає у поступовому покращенні та підвищенні точності надання коректних відповідей на запити користувачів. У традиційному програмуванні комп'ютер виконує алгоритм, який був прописаний заздалегідь. В машинному навчанні надається завдання та набір прикладів, після чого на основі прикладів комп'ютер має вирішити поставлену задачу.

Машинне навчання є потужною технологією, яка використовується у різних сферах. Але водночас це складна технологія, яка вимагає глибоких знань та значних ресурсів, а також має певні ризики. Ці ризики можуть виникнути, як під час розробки та впровадження моделі, так і під час використання.

Одним із ризиків, який може виникнути на етапі розробки моделі є недостатність або неточність даних. Першою причиною виникнення цього ризику може слугувати неправильна анотація даних, некоректні методи для збору інформації або проблеми із джерелом даних. Як наслідок ця модель може неправильно класифікувати зображення або давати неточні рекомендації. Щоб полегшити вплив ризику необхідно ретельно перевіряти дані перед впровадженням. Корисно було б мати декількох людей, які будуть займатися анотацією даних для порівняння результатів їх роботи, виявлення неспівпадінь та підвищенні точності. Другою причиною може бути застарілість даних, через що можуть виникнути упереджені рекомендації. Рішенням для уникнення цього може стати регулярний моніторинг продуктивності моделі. Модель, яка навчена на недостатній кількості даних не матиме змоги передбачати необхідні результати, тому важливо визначити, яка інформація є необхідною, а якщо ризик все ж таки виник, то

треба визначити відсутню інформацію, яка потрібна і заповнити необхідними даними [2].

Ще одним ризиком на етапі розробки може стати перенавчання. Якщо модель надто довго тренується на певній вибірці навчальних даних, то виникає ризик неможливості робити правильні висновки або прогнози на основі нових даних. Тобто модель буде працювати коректно лише з навчальними даними. Перенавчання можна помітити якщо рівень помилок є низьким, а дисперсія високою. Для того, щоб уникнути цього ризику зазвичай частину навчальних даних відкладають до тестових для подальшої перевірки на перенавчання. Якщо навчальні дані мають досить низький рівень помилок, а тестові – високий, то це є свідченням перенавчання [3].

Також при розробці моделі ризиком може стати недостатня кількість експериментів. Виникнення цього ризику може бути пов'язано з недооціненням варіантів використання моделі. Для запобігання треба забезпечити якомога більше різноманітних експериментів, а також необхідний постійний моніторинг моделі, щоб мати розуміння, що необхідно доопрацювати. Уникнення цього ризику дозволить системі працювати стабільніше в реальних умовах експлуатації.

При впровадженні можливе виникнення такого ризику, як недооцінка обсягу роботи. Можливою причиною виникнення є недостатня увага до вимог. Ще можливе недостатнє розуміння, які складнощі виникнуть при інтеграції моделі з іншою системою. Виникнення ризику може призвести до затримок у впровадженні моделі, або перевищенні бюджету. Для уникнення ризику треба мати чітке планування всіх аспектів, які пов'язані не лише з розробкою, а також і з впровадженням моделі.

Ще одним ризиком, який може виникнути при впровадженні моделі є виникнення проблем з масштабуванням. Ризик полягає в тому, що зі зростанням обсягу даних буде збільшуватися навантаження і буде необхідно більше ресурсів, а відповідно і більше часу на обробку. Для уникнення ризику можна оптимізувати алгоритми та забезпечити належну масштабованість інфраструктури на якій працює модель.

На етапі використання моделі також існують певні ризики. Одним із них є втрата актуальності моделі. З часом вимоги до моделі від користувачів можуть змінюватися, або збільшуватися, що призводить до невідповідності поточним потребам. Для запобігання ризику важливо регулярно аналізувати нові потреби та оновлювати алгоритми та параметри моделі для того, щоб вона залишалася ефективною.

Також ризиком є мета використання машинного навчання. Машинне навчання використовується в електронній комерції, соціальних мереж, засобах масової інформації для пропонування вмісту на основі попередньої поведінки користувачів. Критично важливим компонентом безпілотних автомобілів є машинне навчання, допомагає пересуватися дорогами безпечно. Також використовується і в сфері охорони здоров'я для діагностики та пропозицій щодо плану лікування. Можливі і такі варіанти використання, як виявлення шахрайства, фільтрація спаму [4]. Але також можливі і негативні варіанти використання, такі як порушення конфіденційності, тобто може бути побудована модель таким чином, що буде змога отримати особисті дані людей. Також може бути використано модель для дезінформації шляхом фальшивих відповідей. Для уникнення ризику необхідно при розробці дотримуватися всіх технічних, етичних та безпекових заходів.

Отже, машинне навчання є потужною технологією, яка покликана оптимізувати різні процеси та завдання. Однак машинне навчання має перелік ризиків, які можуть виникати на різних етапах. Навчати модель треба актуальними даними, які не містять неточної інформації. Важливо розуміти, що моделі можуть бути використані не лише для позитивних, але й для негативних цілей (порушення конфіденційності, дезінформація, дискримінація). Тому необхідно мати систему аудиту та контролю, яка зможе виявляти та усувати можливі проблеми. Лише урахування всіх потенційних

ризиків та їх мінімізація дадуть змогу створити якісну модель для вирішення актуальних задач.

1. Як машинне навчання впливає на розвиток бізнесу: стаття, 2023. URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/yak-mashinne-navchannya-vplivaye-na-rozvitok-biznesu>

2. Top 3 Examples of How Poor Data Quality Impacts ML: блог. URL: <https://www.sama.com/blog/top-3-examples-of-how-poor-data-quality-impacts-ml>.

3. What is overfitting?: стаття. URL: <https://www.ibm.com/topics/overfitting>

4. What is machine learning and how does it work? In-depth guide: стаття. URL: <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/definition/machine-learning-ML>

NUMERICAL STUDY OF AXISYMMETRIC DEFORMATION PROCESSES OF LAYERED BODIES AND SHELLS TAKING INTO ACCOUNT COMPLEX MATERIAL PROPERTIES

M.O.Babeshko, V.G.Savchenko

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

The method for determining the axisymmetric elastic-plastic stress-strain state of layered bodies and shells made of isotropic and orthotropic materials in the processes of thermo-force loading is proposed. The constitutive equations, describing the deformation processes of isotropic materials along the trajectories of small curvature with allowance for the stress mode, are used. The equations of elasticity theory of orthotropic materials with allowance for the different moduli in tension and compression are used. The numerical results are given.

ВЕКТОРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ E-COMMERCE

М. Ф. Мормуль, О. М. Щитов, Д. М. Щитов

Університет митної справи та фінансів

Електронна комерція є однією з найдинамічніших галузей світової економіки, розвиток якої супроводжується новими викликами у сфері логістики та транспортування. Для сучасного споживача важливі не лише якість товару, а й швидкість та вартість доставки, тому ефективне управління логістичними процесами стає ключовим чинником конкурентоспроможності компаній. Вирішення таких завдань базується на транспортній задачі (ТЗ), що полягає в оптимізації переміщення товарів від постачальників до споживачів з урахуванням витрат, часу доставки, типу продукції та вимог клієнтів. Для моделювання ТЗ застосовують скалярні (двоіндексні та багатоіндексні) й векторні (багатокритеріальні) моделі. Якщо класичні скалярні моделі орієнтовані на мінімізацію витрат, то багатокритеріальні дозволяють одночасно враховувати кілька показників – витрати, час доставки й рівень обслуговування. Їх використання в електронній комерції забезпечує скорочення логістичних витрат, підвищення ефективності транспортних процесів та покращення якості клієнтського сервісу, що формує стратегічну перевагу компаній на динамічному ринку. У сфері електронної комерції транспортна задача знаходить широке застосування у таких типових випадках (табл. 1).

Таблиця 1

Застосування транспортної задачі в е-комерції

Напрямок застосування	Короткий опис	Можливі ускладнення
Оптимізація витрат на доставку товарів до споживачів	Пошук найменш витратних маршрутів і схем перевезення за наявних обмежень.	Неможливість постачань у певні пункти, обмеження обсягів і ресурсів.
Управління запасами	Визначення оптимальних обсягів і розподілу запасів між складами.	Сезонність, обмежені площі, нестабільний попит.
Поліпшення клієнтського досвіду	Скорочення часу доставки через оптимізацію маршрутів.	Дефіцит ресурсів, часові вікна, зміни адрес.
Врахування специфіки товарів	Урахування температурного режиму, крихкості, цінності продукції.	Потреба у спецтранспорті, ризики пошкодження.
Мультиmodalні перевезення	Формування комбінованих ланцюгів із різними видами транспорту.	Координація, затримки, митні обмеження.
Пріоритетний розподіл товарів	Моделювання поставок за важливістю пунктів споживання.	Ризик дефіциту для другорядних зон.
Мінімізація порожнього пробігу	Планування зворотних рейсів для підвищення ефективності транспорту.	Складність маршрутів і географічних умов.
Оптиміальне розміщення складів	Визначення вигідних локацій для складів і хабів.	Нестабільність ринку, зміна логістичних ланцюгів.
Термінові перевезення	Моделювання швидкої доставки швидкопсувних або критичних вантажів.	Жорсткі часові рамки, високі витрати.

Скалярні моделі зручні для базового аналізу, оскільки забезпечують швидку оцінку розподілу товаропотоків між постачальниками та споживачами. Проте в умовах електронної комерції, що характеризується різноманітністю товарів, каналів доставки, часовими обмеженнями та високими вимогами до швидкості й надійності, такі підходи є недостатніми, адже не враховують множинність критеріїв оптимізації, типів транспорту та часових вікон.

У реальних логістичних системах ефективнішими є векторні (багатокритеріальні) моделі, які дозволяють одночасно оптимізувати кілька показників – економічних і часових – та адаптувати логістику до змінних ринкових умов. Вони враховують конфліктність критеріїв і забезпечують пошук компромісних рішень з урахуванням пріоритетності кожного параметра, що робить їх дієвим інструментом управління в e-commerce. Нижче розглянуто кілька векторних моделей ТЗ.

Двокритеріальна ТЗ, де в ролі критеріїв якості беруться сумарна вартість перевезення товару та загальний вантажо-час перевезення, має вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{F}(X) &= \{L(X), T(X)\} \rightarrow \min_{X \in D}; \\ L &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \\ T &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \end{aligned} \quad (1)$$

за обмежень D :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_{ij} &= a_i, \quad i = \overline{1, m}; \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} &= b_j, \quad j = \overline{1, n}; \\ x_{ij} &\geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (2)$$

де m – число пунктів постачання, n – число пунктів споживання; c_{ij} , t_{ij} – вартість та час перевезення одиниці вантажу від i -го постачальника до j -го споживача.

Ця задача зводиться до скалярної ТЗ за допомогою згортки критеріїв ефективності

$$F(X) = \alpha_1 \frac{L(X) - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} + \alpha_2 \frac{T(X) - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $L_{\min} = \min_{X \in D} L(X)$, $L_{\max} = \max_{X \in D} L(X)$, $T_{\min} = \min_{X \in D} T(X)$, $T_{\max} = \max_{X \in D} T(X)$, D – множина обмежень (2).

Узагальнений критерій $F(X)$ включає природну нормалізацію критеріїв якості (зведення до безрозмірного вигляду) та враховує важливість критеріїв за допомогою коефіцієнтів ваги α_1 та α_2 . Ці коефіцієнти може змінювати ОПР (особа, що приймає рішення) для збільшення (зменшення) важливості критеріїв у діалоговому режимі з комп'ютером. Після отримання скалярної ТЗ, вона розв'язується методом потенціалів, і для отриманого оптимального плану знаходяться значення критеріїв $L(X)$ та $T(X)$.

Двокритеріальна ТЗ, де в критеріях якості виступають загальна вартість або загальний вантажо-час перевезення вантажу та час, необхідний для забезпечення усіх споживачів необхідним обсягом продукції, ставиться таким чином (за обмежень (2)):

$$\bar{F}(X) = \{L(X), t(X)\} \rightarrow \min_{X \in D} \quad (4)$$

$$\text{або } \bar{F}(X) = \{T(X), t(X)\} \rightarrow \min_{X \in D}; \quad (5)$$

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (6)$$

$$T(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$t(X) = \max_{x_{ij} > 0} t_{ij} \rightarrow \min \quad (8)$$

При розв'язанні такої ТЗ спочатку знаходиться оптимальний розв'язок більш важливого критерія. Якщо більш важливим критерієм є $L(X)$ з (6) або $T(X)$ з (7), то методом потенціалів знаходиться оптимальний план та мінімум цього критерія, а потім – значення критерія $t(X)$ з (8), що відповідає цьому плану. Якщо більш важливим критерієм є $t(X)$, то методом розвантажувальних циклів за (8) знаходять час, необхідний для забезпечення усіх споживачів необхідним обсягом продукції, після чого розраховується інший критерій $L(X)$ або $T(X)$ у відповідності з оптимальним планом.

Трикритеріальна ТЗ, критеріями якості якої є загальна вартість перевезення вантажу; загальний вантажо-час перевезення вантажу; час, необхідний для забезпечення усіх споживачів необхідним обсягом продукції, має такий вигляд (за обмежень (2)):

$$\bar{F}(X) = \{L(X), T(X), t(X)\} \rightarrow \min_{X \in D}; \quad (9)$$

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (10)$$

$$T(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (11)$$

$$t(X) = \max_{x_{ij} > 0} \{t_{ij}\} \rightarrow \min \quad (12)$$

При розв'язанні такої задачі спочатку згортаються критерії з формул (10) та (11) до узагальненого критерія $F(X)$ згідно з формулою (3). Потім визначається більша важливість критерія $F(X)$ або $t(X)$. Якщо з точки зору ОНР більш важливим є критерій $F(X)$, то методом потенціалів обчислюється оптимальний план, на якому розраховуються значення критеріїв $L(X)$ та $T(X)$. Потім у відповідності з ним знаходиться значення $t(X)$. Якщо більш важливим критерієм вважається $t(X)$, то: 1) методом розвантажувальних циклів знаходиться час, необхідний для забезпечення усіх споживачів необхідним обсягом продукції; 2) обчислюється значення узагальненого критерія $F(X)$ згідно (3) та значення $L(X)$ та $T(X)$. У режимі діалогу ОНР – ЕОМ можна: а) обирати схему компромісу; б) коригувати вагові коефіцієнти критеріїв; в) отримувати компромісний розв'язок, що найкраще враховує поточні умови чи побажання ОНР.

Список літератури

1. Петруня Ю., Мормуль М. та інші. Прийняття управлінських рішень. 5 вид. Дніпро: Університет митної справи та фінансів, 2025. 280 с.
2. Скіцко В. І. Вирішення трьохіндексної транспортної задачі в умовах невизначеності. *Проблеми економіки*. 2018. № 3. С. 246-252.
3. Mormul M., Alexander Shchytyov A., Shchytyov D. Development of vector models and methods for their solution for optimization of logistics. *Technology audit and production reserves*. 2025. no. 4/4(84). P. 51-59. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337246>.

РОЛЬ ПЕДАГОГА В УСПІШНІЙ АДАПТАЦІЇ СТУДЕНТІВ НОВОГО НАБОРУ ДО УМОВ КОЛЕДЖУ

Карпенко І.О., Давидчик О.М.

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

Адаптація (лат. – пристосовування) у психології особистості – це пристосування індивіда до умов соціального середовища та існування в ньому.

Адаптація зумовлена психологічними особливостями студентів молодших курсів, найбільш важливими з яких є:

- а) формування почуття дорослості та власних поглядів,
- б) прагнення до самоутвердження особистості,
- в) устремління до пізнання навколишнього світу,
- г) загострення почуття справедливості та ін.

Студенти приходять у навчальний заклад у тому віці, коли процес ціннісного самовизначення особистості ще не завершений. Тому, основним змістом процесу соціалізації на цьому етапі є адаптація – пристосування індивіда до нових умов.

Студентський період є важливою стадією адаптації й має певні ознаки, зокрема:

- відбувається активне включення молодих людей у нове середовище;
- посилюється самостійність у виборі цінностей, ідеалів, середовища для спілкування, видів діяльності;
- домінуючим фактором впливу стає нове соціальне середовище (академічна група, групи за інтересами).

Студенти-першокурсники в перші тижні навчання відчувають задоволення від досягнення важливої мети — вступу до навчального закладу. Однак трохи згодом, значна кількість першокурсників починає відчувати певні дискомфортні переживання, основною причиною яких є труднощі, що виникають під час навчання. Період адаптації триває, як правило, протягом усього першого року навчання і для більшості студентів-першокурсників завершується успішною соціалізацією.

Адаптація студентів у коледжі ділиться на: професійну адаптацію та соціально-психологічну адаптацію. Професійна адаптація це пристосування до характеру навчального закладу, змісту і специфіки провідного предмету, формування навичок самостійності в навчальній і науковій роботі та системи вимог. Соціально-психологічну адаптацію виділяють як пристосування особистості до групи, взаємовідносин в ній, формування власного стиля поведінки у колективі.

Для полегшення процесів професійної адаптації студентів-першокурсників в коледжі викладачами проводяться тематичні класні години, на яких ознайомлюють студентів із майбутньою професією (так як 1 курс це тільки шкільна програма, студенти можуть відчувати розчарування від того, що ще продовжується школа і вони не відчувають себе електриками, екологами тощо).

Окрім тематичних класних годин доцільно на практичних заняттях розв'язувати не абстрактні задачі, а такі, що наближені до життєвих ситуацій або певним чином пов'язані із майбутньою професією студента. Наприклад, не просто знайти об'єм конуса, а розрахувати кількість автомобілів, що можуть перевести купу щєбінки, яка має конічну форму. Або не просто дослідити функцію на екстремум за допомогою похідної, а знайти кількість одиниць продукції, яку потрібно виготовити і реалізувати, щоб одержати максимальний прибуток.

Також для професійної адаптації корисними є екскурсії на підприємства. Доцільно до них залучати не лише тих студентів, які планують перейти на дуальну освіту, а й першокурсників. Таким чином можна сприяти не лише професійній, а й соціально-психологічній адаптації.

Адаптації та соціалізації першокурсників сприяють спортивні змагання, командні предметні конкурси, виконання спільних проектів тощо.

Важливим фактором у адаптації до навчання є зрозумілість процесу навчання. Кожне заняття, яке проводиться дистанційно необхідно супроводжувати чіткою покроковою інструкцією з лаконічними конспектами, чітко прописаними критеріями оцінювання робіт студентів. На лекціях бажано створити доброзичливу атмосферу, вести діалог за темою, показати здобувачам освіти, що відповідати та задавати питання не страшно.

Також, щоб зробити період адаптації менш складним для студентів, викладачі повинні з перших днів входження їх в нове середовище приймати до уваги індивідуальність кожного студента.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ МАРКЕТИНГОВОЇ СТРАТЕГІЇ РОЗВИТКУ ГОТЕЛЮ

Волосова Н.М., Гносовой Д.В.

Дніпровський державний технічний університет

У виконаному дослідженні розглянуто питання застосування математичних моделей для розробки логістичних стратегій підприємств і розв'язані наступні завдання:

- 1) Виконана систематизація економіко-математичні методів моделювання та цілі їх застосування:
 - Кластерний аналіз, що дозволяє здійснити аргументований поділ клієнтів установи на кластери на основі актуальної інформації та динамічних змін переваг та зацікавлень споживачів.
 - Регресійний аналіз, завдяки якому встановлюються залежності між факторами впливу та поведінкою та вибором споживача.
 - Методи цифрового та квантового маркетингу дають можливість системного осмислення поведінки споживачів у багатофакторному та динамічному середовищі цифрової економіки та використання інтегративного підходу для моделювання поведінкових сценаріїв споживачів.
 - Методи Бейєсівських мереж дозволяють здійснити адаптивне прогнозування поведінки та вибору споживача.
 - Підходи теорії ігор слугують для аналізу стратегічної взаємодії між клієнтами та організаціями.
- 2) Розглянуто основні підходи цифрового та квантового маркетингу та їх використання для вивчення факторів впливу на споживача, моделювання поведінкових сценаріїв споживачів і розробки технологічних карт працівників установи.

Концепції цифрового та квантового маркетингу базуються на контекстуальному аналізі, багатоканальній комунікації та використанні математичних методів для моделювання поведінкових сценаріїв споживачів. Квантовий маркетинг розглядає споживача як складну адаптивну систему, що одночасно перебуває в кількох емоційних та поведінкових станах і виступає концептуальною основою для розробки логістичної стратегії організації. У квантовому маркетингу споживач розглядається цілісно завдяки ефективному використанню аналітики даних і сучасних інформаційних технологій.

- 3) Побудовано математичні моделі розробки комплексної логістичної стратегії організації, що ґрунтуються на положеннях кластерного та регресійного аналізу, підходах квантового маркетингу та засобах машинного навчання.

Використання методів машинного навчання для моделювання прогнозу поведінки споживачів підтвердили актуальність та ефективність підходів цифрового та квантового маркетингу. В основі таких моделей – дані про поведінку споживача в цифрових каналах комунікації. У дослідженні побудована логістична модель як алгоритм машинного навчання для класифікації клієнтів. Засоби нейронних мереж є більш точними у прогнозуванні поведінки клієнтів, а тому перспективи їх використання для оцінки ефективності методів квантового маркетингу набувають все більшої популярності.

Було сформовано наступну схему розробки маркетингової стратегії готелю:

1. Аналіз ринку та конкурентів
2. Визначення цільової аудиторії (сегментація ринку та визначення ідеальних клієнтів, їх потреб, вподобань та очікувань від готельного сервісу)

3. Формування унікальної торгової пропозиції (розробка унікального позиціонування готелю для уособлення його серед конкурентів та приваблювання цільової аудиторії)

4. Постановка SMART - цілей (визначення конкретних, досяжних та релевантних цілей)

5. Визначення оптимальних каналів просування (онлайн-маркетинг: сайт готелю, соціальні мережі, контекстна реклама; SEO – оптимізація: збільшення видимості готелю у пошукових системах; системи онлайн-бронювання; програми лояльності: розробка програм для заохочення постійних клієнтів.

6. Розробка контент-стратегії (створення інформативного, змістовного та привабливого контенту, що демонструє переваги готелю та його послуги, створення ієрархії лояльності за чотирма рівнями прихильності).

7. Ведення конкурентоспроможної цінової політики.

8. Розробка плану реалізації маркетингових заходів та визначення необхідного бюджету.

9. Оцінювання результатів (відстеження ключових показників ефективності: якість послуг; задоволення потреб клієнтів в житті, харчуванні, сервісі та додаткових послугах; створення бренду, який викликає довіру та асоціюється з якістю та унікальністю).

10. Коригування стратегії за результатами оновленої інформації про динаміку поведінки споживача та об'єднання всієї інформації про нього.

Методи цифрового та квантового маркетингу у сукупності з запропонованими математичними моделями дають змогу визначити та спрогнозувати поведінку споживачів, у випадках позитивного досвіду використання запропонованих послуг. Описані підходи створюють умови для об'єднання стандартів екосистеми, що сприятиме ефективній взаємодії маркетологів зі споживачами.

Література

1. Романенко Л. Ф. Цифровий маркетинг: сутність та тенденції розвитку. *Scientific Notes of Lviv University of Business and Law*, 2019. № 23, 80-84 с.
2. Волосова Н.М., Гноєвой Д.В. Graphic model of optimal hotel management organization. *Проблеми математичного моделювання: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф., 27-28 трав. 2025 р. Кам'янське: ДДТУ, 2025. С. 187-188.*
3. Волосова Н.М., Гноєвой Д.В. Математичне моделювання оптимальної діяльності підприємства готельного бізнесу *Importance of Soft Skills for Life and Scientific Success: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference, March 6-7, 2025. FOP Marenichenko V.V., Dnipro, Ukraine, 220 p. P. 54-55.*

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИКЛАДАННІ ВИЩОЇ ТА ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ СТУДЕНТАМ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Худа Ж.В., Тонконог Є.А.

Дніпровський державний технічний університет

У сучасних умовах цифрової трансформації освіти та підвищених вимог до фахової підготовки інженерних кадрів особливої актуальності набуває застосування інноваційних технологій і методичних підходів до викладання вищої математики. Їх головною метою є усунення розриву між засвоєними теоретичними знаннями та

формуванням реальних практичних компетентностей студентів. Переважна більшість описаних інноваційних рішень стосуються саме технологій навчання, у яких реалізуються нетрадиційні методи організації пізнавальної діяльності студентів.

Серед найбільш поширених і ефективних інноваційних технологій навчання, які знайшли застосування в освітньому процесі технічних закладів вищої освіти, можна виокремити: технологія проблемного навчання (problem-based learning); технологія ситуативного моделювання; технологія ділової гри; технологія розвивального навчання; кейс-технологія (case-study); технологія розвитку критичного мислення; технологія проектного навчання; мотиваційні технології, зокрема технологія мотивації успіхом; технологія сугестивного навчання; технологія рівневої диференціації навчального матеріалу. Кожна з цих технологій має власну дидактичну модель, орієнтовану на активізацію пізнавальної діяльності, розвиток інтелектуального потенціалу здобувачів освіти та підвищення рівня сформованості професійних компетентностей.

Початкові етапи впровадження інноваційних змін у систему вищої освіти виявили глибокі суперечності між змістом навчальних програм і реальними запитами сучасного суспільства щодо результатів підготовки фахівців. Зокрема, у викладанні математичних дисциплін у закладах вищої освіти недостатньо застосовуються сучасні педагогічні технології, включаючи методи особистісно орієнтованого та розвивального навчання. У результаті формується суперечність між задекларованими цілями вищої освіти — формуванням компетентного, критично мислячого фахівця — та тими методами, які все ще домінують у навчальному процесі більшості ЗВО. Вивчення математичних дисциплін часто зводиться до засвоєння значних обсягів теоретичного матеріалу та відпрацювання алгоритмів розв'язування стандартних задач. Однак у реальному професійному середовищі випускники часто виявляють неспроможність застосовувати набуті знання в нестандартних, практично орієнтованих ситуаціях. Це, своєю чергою, посилює дисбаланс між репродуктивними та розвивальними стратегіями навчання.

У контексті реформування вищої технічної освіти та переходу до компетентнісної моделі навчання особливого значення набуває впровадження активних методів навчання у викладання вищої математики. Ці методи спрямовані на залучення студентів до активної пізнавальної діяльності, розвиток критичного мислення, здатності до аналізу, аргументації, прийняття рішень і самостійного розв'язання прикладних задач.

Серед найбільш ефективних активних методів навчання вищої математики можна виділити наступні:

1. Проблемне навчання. Передбачає постановку перед студентами відкритих або напівструктурованих проблемних завдань, які не мають однозначного розв'язання. Метод стимулює: розвиток аналітичного та логічного мислення; формування здатності до математичного моделювання та обґрунтування рішень; розвиток когнітивної самостійності та ініціативності.

Наприклад, під час вивчення теми «Диференціальні рівняння» студентам пропонується задача: змодельовати та спрогнозувати динаміку температури в охолоджуваному технічному пристрої. Задача не має єдиного розв'язку й потребує обґрунтування вибору моделі. Очікуваний ефект: розвиток здатності до самостійного аналізу, пошуку та формулювання математичних моделей у складних умовах.

2. Кейс-метод (case-study). Застосовується для аналізу реальних або змодельованих професійних ситуацій, у яких необхідно використати математичні знання для пошуку оптимального розв'язку. Сприяє розвитку: професійного мислення та комплексного підходу до аналізу ситуацій; інтеграції математичних знань із фаховими дисциплінами; комунікативних і командних навичок.

Наприклад, студентам пропонують кейс з оптимізації розміщення деталей на металевій пластині (задача розкрою). Необхідно застосувати методи лінійного

програмування або евристики. Очікуваний ефект: інтеграція знань з математики, інформатики та виробничих процесів; формування практичних навичок.

3. Проектне навчання. Студенти виконують комплексне навчально-дослідне або прикладне завдання, що вимагає застосування математичних методів і засобів ІКТ. Цей метод сприяє: розвитку дослідницької та аналітичної компетентності; формуванню навичок самостійного планування роботи, аналізу результатів та презентації рішень; творчому мисленню.

Наприклад, виконання колективного проекту «Розрахунок електроспоживання підприємства з використанням методів статистики та регресії», який завершується презентацією результатів і рекомендацій. Очікуваний ефект: формування дослідницьких умінь, навичок аналізу даних, оформлення результатів, робота в команді.

4. Моделювання та симуляції. Застосування математичних моделей для дослідження процесів, явищ або об'єктів у межах фахової підготовки. Цей метод розвиває: прикладне мислення, здатність до постановки й формалізації задач; здатність до роботи з цифровими інструментами математичного моделювання.

Наприклад, використання MATLAB для побудови моделей руху тіл за законами механіки, що вивчаються в темі «Інтегрування звичайних диференціальних рівнянь». Очікуваний ефект: здатність застосовувати математичні знання для цифрового моделювання технічних процесів.

5. Групове навчання та навчання у співпраці. Організація роботи в малих групах із колективним розв'язанням задач сприяє: розвитку соціальної та комунікативної компетентності; формуванню відповідальності за результати спільної діяльності; набуттю досвіду взаємодії та взаємо навчання.

Наприклад, студенти об'єднуються в групи по 4–5 осіб для колективного розв'язання прикладної задачі — розробки алгоритму обчислення площі складної фігури методом чисельного інтегрування. Очікуваний ефект: розвиток навичок спілкування, розподілу ролей, відповідальності за частину спільної роботи.

6. Дискусійні методи (діалог, дебати, «круглий стіл»). Застосовуються під час аналізу математичних концепцій, оцінювання правильності рішень або вибору оптимальних стратегій розв'язання задач. Сприяють розвитку: критичного мислення, аргументації та побудови логічно послідовних висловлювань; рефлексивних умінь та навичок само корекції.

Наприклад, проведення «математичних дебатів» за темою «Чи доцільне використання спрощених моделей в інженерних розрахунках?». Студенти формують аргументи, захищають позицію команди. Очікуваний ефект: розвиток критичного мислення, уміння формулювати позицію, захищати власні рішення.

Впровадження у навчальний процес сучасних методів та інноваційних технологій у раціональному поєднанні з традиційними підходами до викладання вищої та прикладної математики є потужним засобом підвищення якості освіти й ефективності підготовки майбутніх фахівців технічного профілю. Застосування інноваційних педагогічних практик сприяє формуванню комплексних і системних знань, розвитку критичного мислення, дослідницьких навичок, а також активізації самостійної пізнавальної діяльності студентів.

ДО ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ІЗ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ

Т.В. Крилова¹, П.О. Стеблянко²

¹*Дніпровський державний технічний університет*

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

Ключовим з навиків та вмінь фахівців із прикладної математики, на думку авторів, є вміння програмувати в різних середовищах та швидко цьому навчатися. Вміння розв'язувати прикладні задачі в різних середовищах за допомогою написання власної програми дає можливість фахівцю мати ширші можливості на ринку праці. Зараз це пов'язано ще й з *вольовим* переводом ПМ в галузь *Інформацій технології*. Прикладна математика використовується для вирішення прикладних задач у фізиці, хімії, біології, тощо. Проте з розвитком комп'ютерних технологій виникає все більша потреба у фахівцях, що можуть використовувати математичні знання в ІТ-технологіях. Це – розробка алгоритмів, задачі проектування, оптимізаційні задачі, теорія керування і, звичайно, аналіз даних. Виходячи з вище зазначеного, на думку авторів, є доцільність при вивченні базових математичних дисциплін, вводити задачі, які можна розв'язувати, програмуючи в різних середовищах (Mathcad, Matlab, Python та інші). Крім традиційних дисциплін широко вивчаються рівняння математичної фізики, числові методи, а також дисципліни, в яких застосовується математичне моделювання. В деяких програмах передбачено дисципліни з програмування, аналізу даних, захисту інформації.

RISK MANAGEMENT OF STABILITY LOSS IN MAIN ROADWAYS DRIVEN THROUGH THE GOAF OF A DESTRESSING LONGWALL

O.P. Krukovskiy, S.A. Kurnosov, Y.Y. Bulich, V.O. Khvorostian

M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Driving main roadways through the goaf of a destressing longwall involves complex geomechanical conditions that increase stability risks. This study applies finite element modelling (elastic–plastic formulation) calibrated with field data from PJSC “Pokrovske Mine” to evaluate the stress–strain state of a layered rock mass at depths of 930–1230 m. Four roadways supported with combined steel–polymer and frame systems were analysed for different distances (50–70 m) and pillar widths (80–140 m) between the active and previously mined longwalls. The spacing between roadways had little impact on their interaction, while pillar width proved decisive. At 120–140 m, the influence of mining operations is minimal; reducing the width to 80 m causes stress transfer to the first and partly the second roadway, increasing roof deformation by up to 200 %. With greater depth, the abutment pressure zone expands by 10–12 %, requiring stronger support.

The results provide a basis for assessing geomechanical risks and optimising roadway layout and support parameters in deep coal mining.

HYDRO-MECHANICAL RISKS ASSOCIATED WITH DELAYED SUPPORT INSTALLATION IN TUNNELS EXCAVATED THROUGH FRACTURED ROCK

O.P. Krukovskyi, V.V. Krukovska

*M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of
Sciences of Ukraine*

Groundwater represents one of the key factors affecting the stability and safety of tunnels, particularly during the early stages of construction, when temporary support and lining have not yet been installed. Delays at this stage may lead to increased rock mass deformation, widening of the permeable zone, opening of fractures, and significant groundwater inflows, potentially resulting in structural hazards and adverse environmental impacts.

To address these challenges, this study develops a finite element model to investigate the coupled processes of rock mass deformation and groundwater flow into a tunnel excavated in intensely fractured hard rocks. The results show that with increasing fracturing, rock strength decreases, the relative principal stress differential is reduced, and susceptibility to brittle failure rises. These conditions result in pronounced tunnel wall displacements, enhanced permeability near the excavation boundary, and, in highly fractured rocks, the development of a wide depression zone in pore pressure. Such alterations in the hydrogeological regime can lower groundwater levels, impact aquifers and natural springs, and trigger soil settlement due to loss of pore pressure.

The findings emphasize the importance of minimizing the time between excavation and support installation, especially when tunneling through disturbed geological zones. The study provides novel insights into the short-term interaction between rock mass disturbance and groundwater flow, contributing to improved risk assessment and design optimization in underground construction.

EFFECT OF LITHOLOGICAL COMPOSITION ON STRESS RELIEF IN THE COAL SEAM FLOOR UNDER MECHANIZED LONGWALL SUPPORT

V.V. Krukovska¹, A.O. Kostrytsia²

¹*M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of
Sciences of Ukraine*

²*Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of
Geotechnical*

Mechanics the National Academy Sciences of Ukraine

Numerical simulation of coupled processes of rock mass deformation and gas filtration was performed using the finite element method. Rock failure was described by the Coulomb–Mohr criterion, and permeability variations were considered as a function of the stress state of the near-contour rocks.

It was established that the lithological structure of the coal seam floor significantly affects the formation of stress-relief zones. The most effective stress reduction and favourable degassing conditions occur in the absence of a siltstone interlayer between the sandstone and the coal seam. With increasing thickness of the siltstone layer, the stress concentration rises, the gas filtration rate decreases, and at a thickness above 1 m filtration is almost completely inhibited. A weak dependence of filtration properties on the alternation of rock layers suggests that the geological structure has little influence on the variation of the gas-dynamic component of outburst hazard with increasing distance from the seam floor. It was confirmed

that outburst prediction must consider spatial variability of the seam-floor lithology, since even a thin low-permeable siltstone layer can significantly alter the geomechanical and gas-dynamic state of the rock mass.

The results can be used to assess and forecast the outburst hazard of coal seam floor zones and to select effective methods of preliminary rock stress relief in complex mining and geological conditions.

TWO-DIMENSIONAL BLAST-WAVE SIMULATION IN AN IDEAL GAS VIA FEM

D.O. Krukovskyi

Dnipro University of Technology

A two-dimensional numerical model of blast-wave propagation in a gaseous medium, based on the compressible Euler equations and an ideal-gas equation of state, is presented. The governing conservation laws are discretised with a triangular finite-element formulation and stabilised using a local Lax–Friedrichs (Rusanov) numerical flux; time integration employs an explicit Euler scheme. The implementation generates an $n \times n$ mesh over a square domain, assembles the semi-discrete system, and advances the solution to capture the spatio-temporal evolution of pressure, density, and energy. Simulations reproduce the salient physics of explosions in air: rapid energy release at the epicentre, formation and outward propagation of a supersonic shock, a positive overpressure phase followed by rarefaction, and compression/expansion trends consistent with gas dynamics. Quantitatively, the model yields large transient overpressures ($p/p_0 \approx 400$ at early times in the reported case) and density jumps across the shock front. The approach offers a practical tool for analysing sensitivity to initial/boundary conditions and for exploring parameter effects relevant to underground safety and protective-structure design. Limitations and extensions are discussed, including the need to incorporate viscous effects, real-gas thermodynamics, and fluid–structure interaction for confined or complex geometries.

MODELING OF NONLINEAR DEFORMATION OF SOME FUNCTIONAL-GRADIENT MATERIALS

P. Steblyanko

P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine; e-mail: caf-vmi@ukr.net

A generalization of the determining relations of nonlinear deformation (nonlinear elasticity, plasticity) for functionally gradient materials (FGM), materials with shape memory effect, and traditional composite materials of granular and fibrous structure is proposed and substantiated.

For the coefficients of the determining relations that describe the dependence of the characteristics of FGM on the type of loading during deformation beyond the elastic limit, and verification of the material parameters was carried out on the basis of known experimental data for functional materials. To write the determining equations, the deformation tensor is represented as the sum of the elastic and plastic deformation tensors.

A method for solving stationary problems of deformation of bodies of revolution made of materials with shape memory effect based on the use of spline functions to increase accuracy has been developed.

THE INFLUENCE OF AGGRESSIVE GROUNDWATER ON METAL SUPPORT IN MINE WORKINGS

Y.O. Vynohradov

Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics the National Academy Sciences of Ukraine

The study investigates the effect of aggressive groundwater on the durability and corrosion resistance of metal support structures used in coal mine workings. A finite element model of a rock mass containing an arched excavation supported by a steel frame was developed. Numerical simulations were conducted to analyze the stress-strain behavior of the rock-support system and to evaluate the corrosion damage of metal elements exposed to moisture. The model considered the presence of a water-saturated layer in the roof, moisture migration through fractured rocks, and time-dependent strength loss of the steel support. The results show that moisture penetration from water-bearing strata leads to the gradual saturation of the roof rocks and subsequent corrosion of the metal frame. The most intensive degradation occurs in the upper part of the frame, where the contact with water is initiated first. The obtained data can be used to predict the service life of metal mine supports and to develop measures for corrosion protection in deep mining conditions.

ОПТИМІЗАЦІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИКЛАДАННЯ ТОЧНИХ ДИСЦИПЛІН В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

М. Ф. Мормуль, Л. А. Романчук, Д. М. Щитов, М. М. Шевченко, Є. П. Єфімова

Університет митної справи та фінансів

В умовах диджиталізації математична освіта набуває особливого значення, оскільки формує у майбутніх фахівців здатність аналізувати, прогнозувати та ефективно застосовувати математичні методи для розв'язання практичних завдань. Сформований рівень математичної культури й аналітичного мислення підвищує конкурентоспроможність спеціалістів та їх уміння взаємодіяти із замовниками й стейкхолдерами. Дистанційне навчання забезпечує можливість отримувати освіту незалежно від місця перебування, що особливо актуально під час війни, коли традиційні освітні установи можуть бути недоступними або перебувати в небезпечних зонах. Крім того, дистанційна форма навчання сприяє розвитку цифрових навичок та самостійності у навчанні, що є важливими компетенціями в сучасному світі.

Серед його переваг – економія часу та коштів, доступність для студентів із різних регіонів і країн, зручність використання електронних матеріалів, можливість контролювати навчальний процес і залучати інтерактивні засоби.

Разом із тим дистанційна форма має недоліки: технічні збої, перебої зі зв'язком, обмежене спілкування з викладачем і підвищене навантаження на заклади освіти [1, с. 8-9], [2, с. 10-11], [3, с. 28].

Функціонал платформи Google Classroom, на якій найчастіше проводяться іспити та заняття, розрахований переважно на гуманітарні дисципліни. Під час же дистанційного викладання точних дисциплін (математики, фізики, інформатики,

економіки тощо) важливо не лише пояснювати матеріал, а й демонструвати формули, графіки та рисунки. Це можна робити одним із трьох способів:

- через планшет або онлайн-дошку, використовуючи мишу чи стилус, що потребує певних навичок і знижує швидкість роботи при великій кількості формул;
- спрямувати веб-камеру на стіл викладача, щоб студенти бачили записи в реальному часі. Якість зображення залежить від камери та інтернету, але цей спосіб дозволяє зберігати матеріали заняття;
- використовувати заздалегідь підготовлені матеріали (через Google Classroom чи екранну трансляцію). Це зручно, проте інформація залишається статичною, і зменшується ефект «живого» спілкування [5, с. 133-134].

При складанні білетів для іспитів чи заліків жоден з цих способів не підходить. Інформацію необхідно заносити безпосередньо у форму платформи. При цьому виникають певні труднощі та незручності. Спираючись на власний досвід, зазначимо деякі з них, а також способи їх подолання:

- у поточній версії Google Classroom відсутня можливість безпосереднього введення формул чи індексів – їх доводиться попередньо створювати в графічному редакторі (наприклад, Paint), зберігати у форматі .jpg і вставляти як зображення, що є незручним і трудомістким (рис. 1);
- аналогічна проблема стосується і рисунків, які не можна вбудувати безпосередньо у текст завдання (рис. 2) [5, с.139-140];
- відсутні інструкції щодо правильного запису ПШБ студентів;
- відсутній український інтерфейс;
- незручно є перевірка завдань через відсутність сортування за часом подання;
- брак сповіщень про повторне надсилання робіт;
- обмеження кількості вкладень (до 20 фото), через що великі розрахункові роботи доводиться надсилати документом Word з гіршою якістю;
- часті проблеми з якістю чи зчитуванням надісланих файлів.

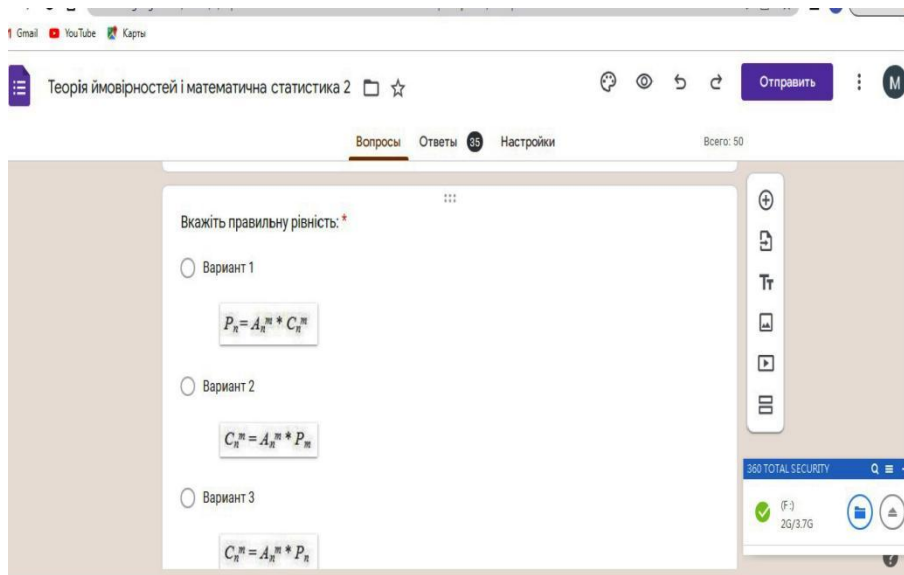


Рис. 1. Спосіб введення формул у «форму» google.classroom не дуже зручний

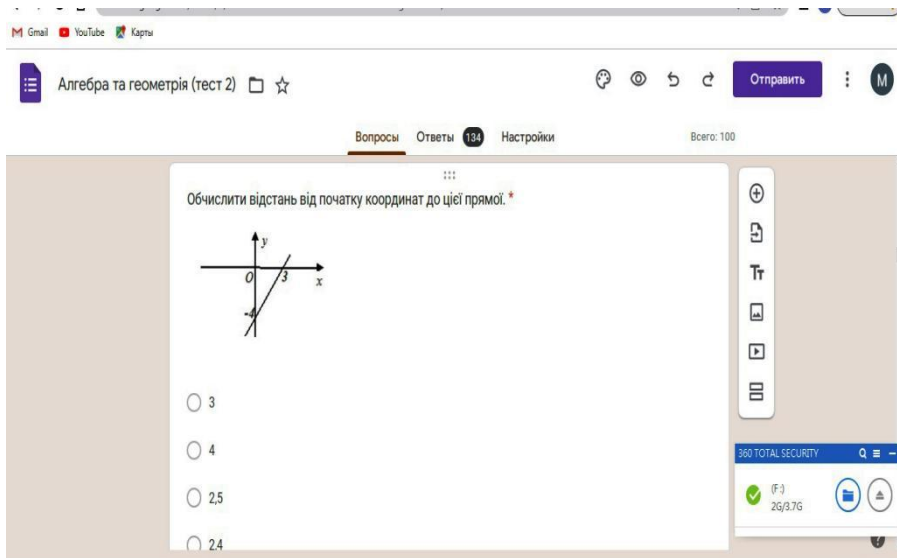


Рис. 2. Введення у «форму» рисунків займає зайвий час

Для покращення зручності роботи платформи доцільно забезпечити підтримку математичних формул, індексів, прямих вставок рисунків і розширити інструменти керування перевіркою робіт [4]. А конкретно:

- 1) додати опцію введення графіків та рисунків простим копіюванням;
- 2) ввести опцію додавання формул безпосередньо через Word;
- 3) при введенні у форму тексту надати можливості використання надрядкових та підрядкових індексів та інших символів і літер (а не через попереднє переведення їх у рисунки);
- 4) додати попередження, що сортування студентів відбувається за першим словом – по імені, а за другим – по прізвищу;
- 5) розробити українську або мультимовну версію гугл форми та класрум;
- 6) додати опцію сортування за часом;
- 7) інформувати про надходження нової версії роботи;
- 8) інформувати про нові роботи;
- 9) збільшити кількість фото, рисунків чи графіків, які можна причіпляти до тексту.

Модернізація інтерфейсу платформ дистанційного навчання суттєво підвищить ефективність організації освітнього процесу. Це дозволить спростити й прискорити створення тестів та екзаменаційних білетів з математики та споріднених дисциплін, удосконалити подання завдань, зробити інтерфейс інтуїтивно зрозумілим, а також оптимізувати роботу зі списками слухачів і результатами тестувань. Впровадження гнучких інструментів керування розкладами й комунікацією між учасниками навчального процесу підвищить стабільність та зручність онлайн-викладання.

З огляду на часті вимкнення електропостачання та загрозу перебоїв у роботі енергетичної системи країни, доцільно запровадити адаптивний, “плинний” розклад занять у дистанційному форматі. Це дасть змогу викладачам оперативно змінювати час проведення лекцій чи практичних занять, а студентам – отримувати автоматично збережені електронні копії занять у разі неможливості долучитися до них у реальному часі. Такий підхід забезпечить неперервність навчального процесу навіть за кризових умов.

На нашу думку, доцільно також передбачити систему освітніх пільг і послаблень для студентів, мобілізованих до лав Збройних Сил України або тих, хто проходить службу у військових підрозділах, але прагне продовжувати навчання. Замість стандартного оформлення академічної відпустки варто забезпечити їм можливість

індивідуального навчального графіка, дистанційного складання іспитів і заліків, а також доступ до електронних матеріалів курсів у зручний для них час. Такі зміни сприятимуть збереженню освітньої траєкторії студентів-військовослужбовців, підвищать їхню мотивацію до саморозвитку та підтримають зв'язок із академічним середовищем навіть у складних умовах служби. Крім того, доцільно передбачити інституційні механізми підтримки – наприклад, створення координаторів або кураторів груп мобілізованих студентів, які допомагатимуть з організацією навчання та поданням робіт з контрольних завдань після повернення з фронту.

Список використаної літератури

1. Андрусенко Н. В. Дистанційне навчання в Україні. *Дистанційне навчання як сучасна освітня технологія: матеріали міжвузівського вебінару 31 березня 2017 року*. Вінниця: ВТЕІ КНТЕУ, 2017, сс.7-9.
2. Блажко О. Сучасні тенденції розвитку дистанційного навчання студентів у ВНЗ. *Дистанційне навчання як сучасна освітня технологія: матеріали міжвузівського вебінару 31 березня 2017 року*. Вінниця: ВТЕІ КНТЕУ, 2017, сс.10-11.
3. Дистанційне навчання в глобалізованому світі: Міжвузівський науково-методичний семінар. Тези доповідей. Київ: Київський нац. торг.-екон. ун-т, 2021. 101 с.
4. Мормуль М. Ф., Щитов Д. М., Щитов О. М., Романчук Л. А., Чупілко Т. А. Особливості дистанційного викладання математики в українських навчальних закладах за умов воєнного стану. *Вища освіта України у контексті інтеграції до європейського освітнього простору*. 2023. № 1, II (91). С.131-142.
5. Мормуль М. Ф., Щитов Д. М., Щитов О. М., Романчук Л. А., Чупілко Т. А. Напрями покращення дистанційного викладання математики в Україні за умов воєнного стану. *European Humanities Studies: State and Society*. 2024. Vol. 2. С. 74-86. URL: <https://ehs.eeipsy.org/index.php/ehs/article/view/437/412>.

ВІДНОВЛЕННЯ ПОТЕНЦІАЛЬНОГО 2D ПОЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОТЕНЦІАЛІВ ПОДВІЙНОГО ШАРУ З В-СПЛАЙНОВОЮ ФУНКЦІЄЮ ЩІЛЬНОСТІ

А.О. Молчанов

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розглядається спосіб відновлення потенціальних фізичних полів, який називають метод фундаментальних розв'язків (MFS). Основна ідея методу полягає в тому, що гармонічна функція, яка описує потенціальне поле в деякій області Ω , апроксимується комбінацією лінійно незалежних розв'язків рівняння Лапласа:

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

де $\Phi_i(x) = \Phi(x - y_i)$, з точками сингулярності y_i , обраними навколо тої області, в якій потрібно відновити поле. Для 2D випадку $\Phi(x) = -\frac{1}{2\pi} \ln|x|$.

Оскільки функції $\Phi_i(x)$ є аналітичними в заданій області й погано пристосовані для задач з неаналітичними граничними умовами, то для задач з

сингулярною границею пропонується лінійну комбінацію (1) доповнити функціями виду:

$$\tilde{u}(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \Phi_i(x) + \sum_{r=0}^p \beta_r \Psi_r(x), \quad (2)$$

де остання сума – лінійна комбінація функцій, кожна з яких є потенціалом подвійного шару:

$$\Psi_r(x) = \int_{\Gamma_1} \partial_{\nu_y} \Phi(x-y) b_{r,3}(y) ds_y, \quad (3)$$

де Γ_1 - ділянка границі, що містить сингулярність, ν_y - одиничний вектор нормалі в граничних точках $y \in \Gamma$, що вказує назовні області Ω . Такі функції є гармонічними й аналітичними всередині Ω й їх сліди (тобто функції щільності) на ділянці границі Γ_1 є b -сплайнами 3 степеня, носії яких належать ділянці Γ_1 .

Розглянуто сплайни з рівномірним розташуванням вузлів та із експоненційним згущенням вузлів до кінців ділянки Γ_1 . Для рівномірного розташування вузлів розроблено як чисельний розрахунок дискретизацією інтегралу так і аналітичне представлення функцій виду (3).

1. Carlos J.S. Alves, Svilen S. Valtchev, Applied Mathematics and Computation. 320(3): 61-74 (2018).
2. Molchanov A.O. Problems of applied mathematics and mathematical modeling. Volume 24: 134-140 (2024).

ІНОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В АВТОМОБІЛЕБУДУВАННІ

А.П. Коваленко О.М. Давидчик

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

У сучасному світі автомобільна індустрія перебуває на передовій у впровадженні інноваційних технологій, які значно змінюють спосіб проектування, виробництва та експлуатації транспортних засобів. Розвиток новітніх технологій дозволяє підвищити безпеку, знизити вплив на навколишнє середовище та зробити автомобілі більш комфортними та ефективними.

Одним із найголовніших напрямків є використання легких матеріалів, таких як вуглецеве волокно та алюміній. Це дозволяє зменшити масу автомобіля, що, у свою чергу, сприяє підвищенню паливної економічності та зменшенню викидів шкідливих газів. Виготовлення кузовів із таких матеріалів стає більш доступним завдяки розвитку нових технологій виробництва, зокрема 3D-друку та автоматизованих процесів зварювання.

Ще однією важливою технологією є впровадження систем електрифікації. Електромобілі (EV) набирають все більшої популярності завдяки своїй екологічності та здатності зменшити залежність від викопних джерел енергії. Інновації у батареях, зокрема використання літій-іонних акумуляторів з високою ємністю, дозволяють

збільшити пробіг на одному заряді та скоротити час зарядки. Також активно розвиваються технології швидкої зарядки та інфраструктура для електромобілів.

Розумні системи допомоги водієві (ADAS) є ще одним важливим напрямком інновацій. Вони включають автоматичне гальмування, систему контролю смуги руху, адаптивний круїз-контроль та камери кругового огляду. Ці технології підвищують безпеку та комфорт, зменшуючи ймовірність аварій та зменшуючи навантаження на водія. Застосування штучного інтелекту у системах управління дозволяє створювати автомобілі майбутнього з рівнем автономності, що відкриває нові горизонти у мобільності.

Ще одним напрямком є впровадження інтелектуальних транспортних систем (ITS), які забезпечують більш ефективне управління дорожнім рухом, оптимізують маршрути та зменшують затори. Інтеграція автомобілів у мережу «розумного міста» дозволяє підвищити безпеку, знизити витрати пального та покращити якість життя мешканців.

Важливу роль у розвитку сучасних технологій відіграє також автоматизація виробничих процесів. Використання робототехніки, автоматичних систем зварювання, лазерних технологій та систем контролю якості забезпечує високу точність, зменшує виробничі витрати та підвищує надійність автомобілів.

Отже, інноваційні технології у машинобудуванні автомобілів сприяють створенню більш безпечних, екологічних та ефективних транспортних засобів. Впровадження легких матеріалів, електрифікація, системи допомоги водієві, інтелектуальні транспортні системи та автоматизація виробництва — це лише частина напрямків, які визначають майбутнє автомобільної промисловості. Очевидно, що технологічний прогрес продовжуватиме відкривати нові можливості для розвитку автомобілів майбутнього, роблячи їх більш розумними, безпечними та дружніми до навколишнього середовища.

Інноваційні технології в машинобудуванні автомобілів

У сучасному світі швидкого технічного прогресу автомобільна промисловість зазнає значних змін, впроваджуючи інноваційні технології, які змінюють уявлення про комфорт, безпеку та ефективність транспортних засобів. Ці нововведення дозволяють створювати більш екологічно чисті, безпечні та економічні автомобілі, що відповідають сучасним вимогам до мобільності.

Однією з ключових тенденцій у машинобудуванні автомобілів є застосування електрифікації. Відповідно до сучасних досліджень, попит на електромобілі зростає в усьому світі через зменшення залежності від викопних джерел енергії та прагнення знизити викиди шкідливих речовин. Інноваційні технології у виробництві батарей, такі як твердотільні акумулятори, дозволяють підвищити їхню ємність та безпеку, скорочуючи час зарядки та збільшуючи запас ходу. Це сприяє популяризації електромобілів та їхньому широкому впровадженню.

Ще однією важливою сферою є використання штучного інтелекту і систем автоматичного керування. Сучасні автомобілі обладнані сенсорами, камерами та радаром, що дозволяють їм самостійно орієнтуватися у просторі, уникати перешкод та навіть здійснювати часткове або повне самостійне керування. Технології автопілота вже проходять випробування і мають потенціал значно зменшити кількість ДТП, підвищити комфорт водіїв і знизити навантаження на дорожню інфраструктуру.

Крім того, у машинобудуванні широко застосовуються інноваційні матеріали, зокрема легкі сплави та композити, що дозволяють зменшити вагу автомобіля без втрати міцності та безпеки. Це не лише покращує динамічні характеристики та зменшує витрати палива, але й сприяє зниженню викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Інноваційні технології також активно впроваджуються у системи безпеки. Сучасні автомобілі оснащені передовими системами допомоги водієві, такими як

автоматичне гальмування, контроль смуги руху, моніторинг сліпих зон і адаптивний круїз-контроль. Це підвищує рівень безпеки пасажирів і знижує ризик дорожньо-транспортних пригод.

Важливою складовою є і цифровізація виробництва. Використання робототехніки, 3D-друку та цифрових двовимірних моделей дозволяє значно прискорити процес розробки та виробництва автомобілів, знизити їхню вартість та підвищити якість продукції.

Загалом, інноваційні технології в машинобудуванні автомобілів сприяють формуванню більш безпечного, екологічно чистого та економічного транспорту. Вони відкривають нові можливості для виробників і споживачів, роблячи автомобільний транспорт більш відповідальним і сучасним. У майбутньому можна очікувати ще більшого впровадження інтелектуальних систем, альтернативних джерел енергії та нових матеріалів, що дозволять створювати автомобілі, здатні задовольняти найсміливіші потреби та виклики XXI століття.

ДВОСТОРОННІЙ АПОСТЕРІОРНИЙ ОЦІНЮВАЧ ПОХИБКИ НЕЙМАНА-ДІРІХЛЕ АПРОКСИМАЦІЙ МЕТОДУ α -FEM

Я.В. Гусаревич

ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, yanina.husarevych@gmail.com

Метою даної роботи є побудова апостеріорного оцінювача похибок Неймана та Діріхле апроксимацій методу α -FEM. α -FEM є комбінацією стандартного методу скінченних елементів та NS-SFEM (node-based smoothed finite element method) з параметром α , що дає змогу отримати верхню та нижню межі точного розв'язку для задачі пружності в енергетичній нормі шляхом відповідного вибору параметру α . На основі отриманих результатів побудовано алгоритм автоматизованого згущення сітки. Розглядається квадратна пластинка з центральним квадратним отвором рівномірно навантажена по лівому краю тиском $=0.1 \text{ Н/м}^2$ та жорстко закріплена вздовж нижнього, решта ребер плити вільні від навантажень. Матеріал плити – алюміній. Припускається, що ребро отвору має довжину $b=0.5 \text{ м}$, зовнішнє ребро плити – $a = 1 \text{ м}$. В площині $x_1 O x_2$ конструкція займає область $\Omega = \Omega_0 / \Omega_1$, де $\Omega_0 = \{x = (x_1, x_2) : 1 \leq x_1, x_2 \leq 2\}$ і $\Omega_1 = \{x = (x_1, x_2) : |x_i - 1.5| \leq 0.5, i = 1, 2\}$.

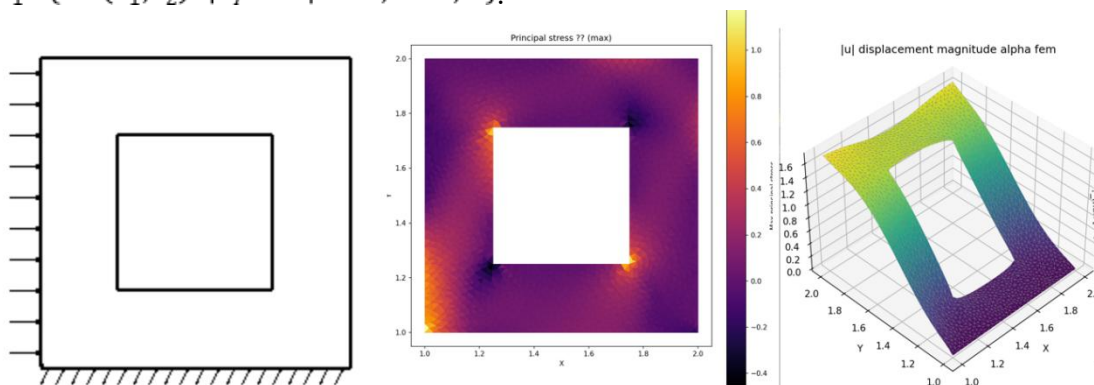


Рис. 1. Конструкція з квадратним отвором: умови закріплення та навантаження, максимальні головні напруження, нормалізований модуль переміщень

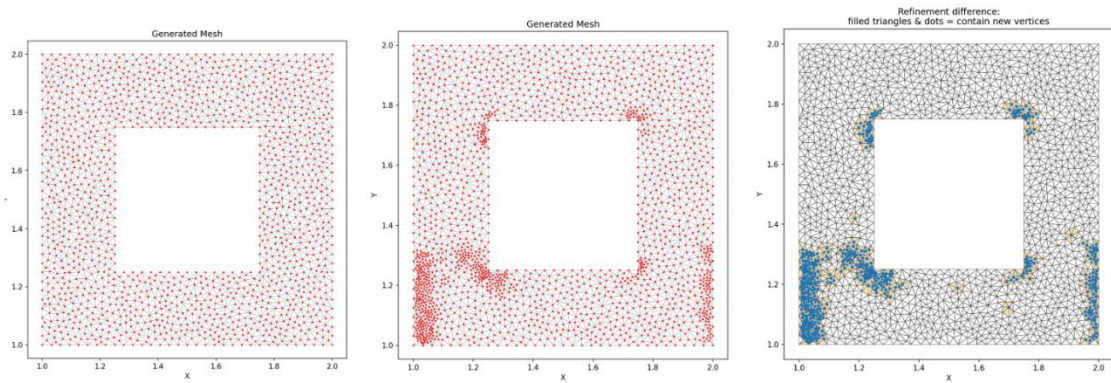


Рис. 2. Автоматизоване згущення сітки на основі розподілу оцінки похибки по елементах

Побудований оцінювач демонструє високу чутливість до локальних особливостей поля напружень, зокрема поблизу внутрішніх вершин отвору та сингулярностей, зумовлених змішаними крайовими умовами. Відповідні значення оцінювача зростають у цих зонах, що узгоджується з очікуваннями та вказує на коректну локалізацію зон максимальної похибки.

ДО ПИТАННЯ СТВОРЕННЯ ДРОНІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ВИСОКОЮ АЕРОДИНАМІЧНОЮ ЯКІСТЮ

Сохацький А.В.

Інститут транспортних систем та технологій НАН України

Останнім часом з'явилася значна кількість дронів з багатороторними системами. Їх характерною особливістю є наявність кількох рушійних систем. Принцип польоту подібний до гелікоптерного. Відповідно, це дає можливість безаеродромного зліту. Вони надзвичайно ефективні в міській забудові, можуть виконувати скритний політ у відповідності з рельєфом місцевості. Проте їх енергетичні можливості незначні. Як правило, вони працюють на відстані до 10 км.

Ефективним повинен бути дрон який б поєднували властивості, як літака так і гелікоптера. Тому пропонується розгляд концепції дрона з наявністю крила великого видовження. Наявність двох двигунів дозволить йому стартувати, як гелікоптер. Проте надалі підймальна сила буде забезпечуватися крилом. Крило великого видовження надасть йому високу аеродинамічну якість. Це дозволить йому літати на великі відстані, подібно планерній системі польоту. Запропонований підхід надає економне використання енергії та можливість доволі довгий час знаходитися в повітрі. Такий тип літального апарата підвищить ефективність виконання завдань.

ДЕЯКІ СПІВВІДНОШЕННЯ ДЛЯ ОПЕРАТОРА ДЖЕКСОНА

Давидчик О.М., Карпенко І.О., Коваленко А.П.

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

Позначимо через z_n множину лінійних додатних операторів виду

$$U_n(f; x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+1) z_n(t) dt,$$

$$z_n(t) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \rho_k^n \cos kt, \quad z_n(t) \geq 0.$$

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

$$L_r(U_n, \delta) = \sup_{f^{(r)} \in C/R} \frac{\|f - U_n(t)\|}{\omega(f^{(r)}, \delta)}.$$

де $\omega(f^{(r)}, \delta)$ – модуль безперервності функції $f(x)$.

Якщо розглянути оператора Джексона з ядром

$$d_n(t) = \frac{3}{2N(2N^2 + 1)} \frac{\sin^4\left(\frac{Nt}{2}\right)}{\sin^4\left(\frac{t}{2}\right)},$$

де $N = E\left(\frac{n}{2}\right) + 1$

тоді $L(D_n, \frac{\gamma}{n}) = 1 + \frac{3}{\pi} \sum_{k=1}^n Q\left(\frac{k\gamma}{n} + O\left(\frac{1}{n}\right)\right)$

де $Q(z) = \int_z \frac{\sin^4 t}{t^4} dt$

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ПОСЛІДОВНОЇ АПРОКСИМАЦІЇ ДО ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЗУСИЛЬ ВЗДОВЖ АНКЕРУ З ВРАХУВАННЯ ГЛИБИНИ РОЗТАШУВАННЯ ВИРОБКИ

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

Інститут геотехнічної механіки НАН України, Україна
zemlanaaulia19@gmail.com

Як правило, використання узагальненої задачі М.Є. Жуковського дозволяє отримувати величини зусиль в системі «анкерна штанга – фіксуєча суміш – гірська порода». За цих обставин глибина розташування виробки не входить до результатів розв'язку задачі. Для врахування гідростатичного тиску на певній глибині необхідно проводити додаткові дослідження. Для врахування такого впливу розв'язувалась задача про напружено деформований стан у околі металополімерного анкера з використанням МСЕ методу. Для послідовності глибин (від 600м до 1000 м) визначалось середньо інтегральне значення того чи іншого зусилля. Визначався коефіцієнт глибини як відношення значень отриманих з використанням МСЕ методу до значень отриманих з використанням узагальненої задачі М.Є. Жуковського. Апроксимуючи множину коефіцієнтів глибини отримували залежність коефіцієнту глибини у вигляді поліному третього ступеня. Таким чином шукане середньо інтегральне значення параметру визначалось у вигляді добутку отриманої залежності і формули за результатами використання узагальненої задачі М.Є. Жуковського .

Виробка: шириною 5 м, висотою 3 м, знаходиться на глибині 800 м ($\sigma_0=20$ МПа), міцність аргіліту складає 30 МПа. Металополімерний анкер довжиною 2.4 м. Діаметри анкерних штанг які використовувались для розрахунку напружено-деформованого стану у околі анкера: 0,02 м, 0,022 м, 0,025 м, кількість анкерів в ряду 5 шт, відстань між анкерами в ряду складала 1 м.

Вплив глибини розташування анкерного шпур у здійснюється за рахунок тиску, який діє на його поверхню і є пропорційним гідростатичному тиску на цій глибині. У зв'язку з цим актуальності набуває оцінка похибки у визначенні величини середньо інтегральних значень зусиль в системі « анкерна штанга фіксуєча суміш-гірська порода» для невагомого півпростору у околі анкерного шпур у.

Постановка задачі здійснюється у рамках методу скінчених елементів як найбільш універсального та такого, який став засобом перевірки достовірності розв'язків, отриманих іншими чисельними або аналітичними методами. Розв'язок задачі здійснюється методом скінчених елементів.

Результати розв'язку поставленої задачі отримано за наступних даних: $L_a = 2,25$ м; $Q = 5 \cdot 10^4$ Н; $d_a = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м; $d_{vt} = 0,032$ м; $h_a = 0,0165$ м; $h_{vt} = 0,00065$ м; $E_a = 1,2 \cdot 10^{11}$ Па; $E_{vt} = 9 \cdot 10^9$ Па; $E_{rock} = 6 \cdot 10^9$ Па, де Q – попереднє навантаження анкерної штанги; d_a, d_{vt} – діаметри анкера та шпур у відповідно; h_a, h_{vt} – відстань між виступами штанги анкера і поверхні шпур у відповідно; E_a, E_{vt}, E_{rock} – модулі пружності анкера, втулки із фіксуєчої суміші та гірської породи відповідно

Методика виконання перевірки на адекватність отриманих результатів у порівнянні з результатами отриманими МСЕ методів виглядає наступним чином;

1. Обираємо глибину розташування гірничої виробки, яку необхідно закріплювати;
2. Отримуємо таблицю даних розподілу зусиль вздовж анкера методом МСЕ. Виконуємо апроксимацію даних та знаходимо середньо інтегральне значення W_{FEM} ;
3. Отримуємо розподіл зусиль вздовж анкерної штанги запропонованим методом. Виконуємо апроксимацію даних та знаходимо середньо інтегральне значення W_M ;

4. Знаходимо коефіцієнт корекції запропонованого виразу для чого знаходимо їх співвідношення, а саме $K_{cor} = W_{FEM}/W_M$;

5. Знаходимо коефіцієнт пропорційності до запропонованого виразу зусиль шляхом перемноження його на коефіцієнт корегування K_{cor} ;

6. Маючи множину коефіцієнтів корекції з глибиною знаходимо апроксимацію як функцію глибини. Іншими словами ми маємо один із добутоків до отриманої формули у вигляді залежності від глибини розташування виробки.

Користуючись таблицями даних розподілу зусиль вздовж анкеру для глибин 600 м, 700 м, 800 м, 900 м та 1000 м отриманими МСЕ методом отримаємо апроксимації поліномами третього ступеню

Результати аналізу отриманої інформації з допомогою МСЕ методу та виразу для обчислення середньо інтегральних величин зусиль дозволив зробити висновки про наступне:

$$W_{FEM} = \frac{1}{L_{arch}} \int_0^{L_{arch}} (a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3) dx.$$

Формула наведена для визначення середньо інтегрального значення даних отриманих запропонованим методом має вид:

$$P_{ktest} = K_{last} \frac{qd_{vt}^{3.73} E_{vt}^{3.73} h_a^{0.96} h_{vt}^{0.034}}{d_a^{3.91} E_a^{0.735}}.$$

Тоді коефіцієнт корекції буде визначатиметься відношенням значень отриманими за

цими двома методами: $K_{cor} = \frac{W_{FEM}}{\tilde{P}_{ktest}}$

Таким чином, для отримання формули обчислення середньо інтегрального значення зусиль зафіксованого у гірській масив анкеру необхідно помножити результат отриманий для висмикування на коефіцієнт корегування, а саме:

$$\tilde{P}_{ktest} = K_{cor} K_{last} \frac{qd_{vt}^{3.73} E_{vt}^{3.73} h_a^{0.96} h_{vt}^{0.034}}{d_a^{3.91} E_a^{0.735}}.$$

$$P_{ktest} = A_p (0.099 + 0.00277H - 2.65 \cdot 10^{-6} H^2 + 8.33 \cdot 10^{-10} H^3) \frac{qd_{vt}^{3.73} E_{vt}^{3.73} h_a^{0.96} h_{vt}^{0.034}}{d_a^{3.91} E_a^{0.735}}$$

Таким чином середньо інтегральне значення зусиль вздовж анкеру може визначатися за наведеною формулою і воно буде співпадати з отриманим значенням з допомогою МСЕ методу, що і треба було досягти.

1. Larionov H. I. On the one parameters influence evaluating method employed to evaluate the support capacity of a metal-resin anchor / H. I. Larionov, M. H. Larionov // Modeling of the soil-structure interaction. Mechanical engineering theory and application. Editor Todor Zhelyazov. ISBN: 978-1-53617-683-4, 2020 NOVA Science Publishers, Inc, pp. 87–101.

SUCCESSIVE APPROXIMATION METHOD USING FOR LONGITUDINAL ANCHOR EFFORTS DISTRIBUTION OBTAINING IN THE DEPTH OF THE OPEN LOCATION

Oleksandr Krukovskiy, Hryhorii Larionov, Yuliia Zemlyana

Abstract. As a rule, the use of the generalized problem of M.E. Zhukovsky allows obtaining the magnitude of the forces in the system "anchor rod - fixing mixture - rock". Under these

circumstances, the depth of the working is not included in the results of solving the problem. To take into account the hydrostatic pressure at a certain depth, additional studies must be conducted. To take into account such an influence, the problem of the stressed-strain state in the vicinity of the metal-polymer anchor was solved using the FEM method. For a sequence of depths (from 600 m to 1000 m), the average integral value of a particular force was determined. The depth coefficient was determined as the ratio of the values obtained using the FEM method to the values obtained using the generalized problem of M.E. Zhukovsky. By approximating the set of depth coefficients, the dependence of the depth coefficient was obtained in the form of a third-degree polynomial. Thus, the desired average integral value of the parameter was determined as the product of the obtained dependence and the formula based on the results of using the generalized problem of M.E. Zhukovsky.

Keywords: metal-polymer anchor, generalized problem of M.E. Zhukovsky, system "anchor rod - fixing mixture - rock", depth of the working, finite element method.

AN INTERFACE CRACK WITH A LIMITED ELECTRIC PERMEABILITY IN 1D PIEZOELECTRIC QUASICRYSTAL

M. Altoumami, V. Loboda

Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine

Quasicrystals (QCs) are non-periodic solids with long-range order and unusual physical properties. In piezoelectric quasicrystals the interaction of phonon, phason and electric fields becomes essential when defects such as interface cracks are present. A realistic description of such configurations must take into account not only the mechanical interaction between the two materials but also the possibility of a limited transmission of electric displacement across the crack faces.

We consider the out-of-plane for an interface crack between two one-dimensional piezoelectric QC occupying the half-planes $x_2 > 0$ (material 1) and $x_2 < 0$ (material 2). The coupled behavior of phonon, phason stress-displacements and electric induction-electric potential are described for each material by

$$\{\sigma_{32}, H_{32}, D_2\}^T = \mathbf{B} \{u_{3,2}, w_{3,2}, \varphi_{,2}\}^T, \quad (1)$$

where \mathbf{B} is the 3×3 electro-elastic coupling material matrix. The electric permeability condition on the crack surfaces is modelled by a linear relation between the jump of electric displacement and the jump of electric potential

$$D_0 = -\varepsilon_a \frac{\varphi^+ - \varphi^-}{u_3^+ - u_3^-} \text{ for } x_1 \in (-a, a), \quad (2)$$

where ε_a is a dielectric permittivity of the crack filler.

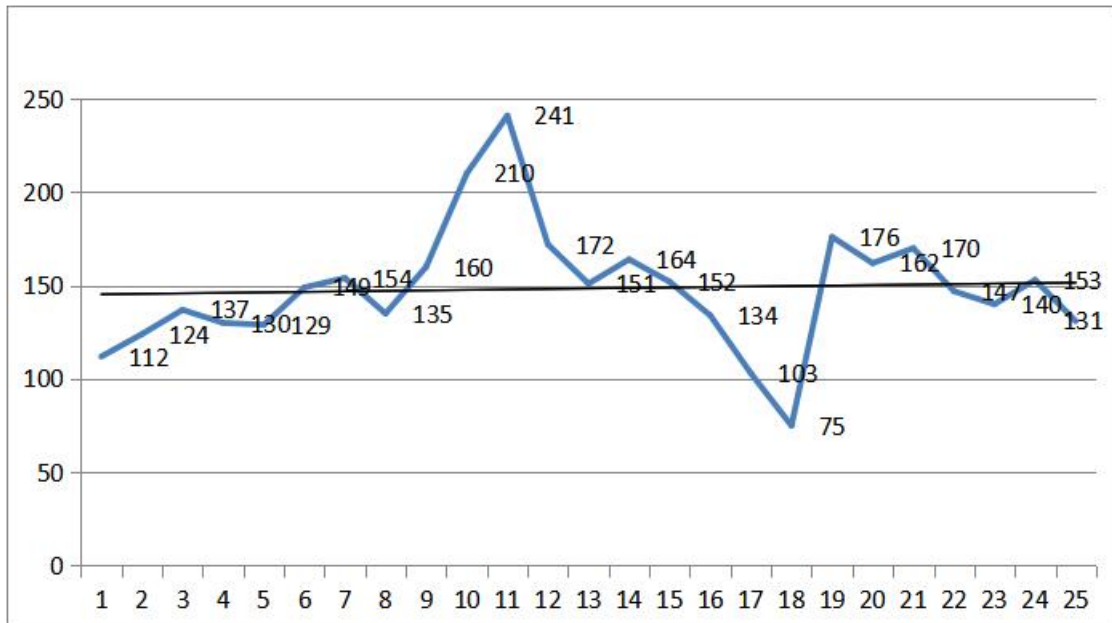
By means of the complex function method the problem is reduced to a vector Hilbert boundary-value problem on the real axis. This problem is solved exactly and also the quadratic equation with respect to the electric flux through the crack region is obtained additionally.

For considered type of electrical conditions at the crack faces, analytical formulas for phonon and phason stresses and displacement jumps, as well as for electrical components along the material interface, were found. In addition, analytical formulas for the corresponding stress intensity factors at the crack tips were obtained.

For numerical illustration, three loading options were selected, including different values of phonon and phason stresses and electrical displacement, specified at a distance from the crack. For each of the specified options, corresponding values of the electric flux through the crack region were found. Other numerical results are presented in graphical and tabular

form. In particular, graphs of changes in phonon and phason shear stress and electrical displacement along the right continuation of the crack are presented. In addition, variations in phonon and phason displacement jumps of the crack faces and the jump of the electric potential in the crack region are also given. Based on the analysis of analytical and numerical results, conclusions were drawn regarding the qualitative features of the deformation of a piezoelectric quasicrystalline composite with a type III crack at the interface of the materials.

**МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ
МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ**



Кількість доповідей за 2001-2025 роки

ПАМ'ЯТІ ОЛЕКСАНДРА ГАЛІШИНА

М.О. Бабешко

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України



26 листопада 2025р. сповнюється 70 років з дня народження відомого вченого-механіка, завідувача відділу термопластичності (2016-2024рр.) Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, доктора технічних наук Олександра Закір'яновича Галішина. Галішин О.З. народився в Києві. Закінчив механіко-машинобудівельний факультет Київського політехнічного інституту. Працював у відділі термопластичності Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ з 1979 р. молодшим, старшим і провідним науковим співробітником, а з березня 2016 очолював відділ термопластичності.

Становлення наукового світогляду і діяльність О.З. Галішина в період 1979 – 2016 р.р. відбувалися в творчому колективі відділу термопластичності, незмінним керівником якого з моменту створення в 1972р. до 07.03.2016р. був академік НАНУ Ю.М.Шевченко. Під керівництвом академіка НАНУ Ю.М.Шевченка в 1985 р. О.З.Галішин захистив кандидатську дисертацію, а в 2006р. – докторську.

Основні наукові результати О.З.Галішин одержав в області механіки деформівного твердого тіла, комп'ютерної механіки, теорії оболонки, механіки континуального руйнування матеріалів. Значна частина наукових досліджень О.З.Галішина була спрямована на математичне моделювання поведінки оболонкових систем різного призначення, зокрема тонкостінних елементів трубопроводів. Широко відомі роботи О.З.Галішина, присвячені дослідженням непружного напружено-деформованого стану розгалужених оболонкових систем в процесах неізотермічного навантаження. За розробку автоматизованих систем розрахунку складних оболонкових конструкцій О.З.Галішин в складі колективу розробників був відзначений премією ЦК ЛКСМУ і Української республіканської ради науково-технічних товариств (1987 р.).

В останні два десятиріччя О.З.Галішин працював над математичним і комп'ютерним моделюванням поведінки з оцінкою міцності елементів авіаційної та ракетно-космічної техніки. Результати досліджень О.З.Галішина, присвячені аналізу напружено-деформованого та граничного стану тонких та середньої товщини оболонки з матеріалів, властивості яких залежать від виду навантаження в умовах пошкодження при повзучості, викликали значний інтерес наукових кіл.

Науковий доробок О.З.Галішина сягає понад 150 наукових праць, опублікованих у вітчизняних та зарубіжних виданнях. О.З.Галішин був членом Національного комітету України з теоретичної та прикладної механіки, членом редколегії міжнародного журналу «Прикладна механіка».

О.З.Галішин пішов з життя 29.06.2024р. Всі, хто спілкувався з О.З.Галішином, відзначають як його широку ерудицію в різних галузях механіки, так і високі людські якості – щирість, доброту, готовність допомогти. Світла пам'ять про відомого вченого та цікаву особистість Олександра Закір'яновича Галішина назавжди збережеться в душах тих, хто з ним працював і спілкувався.

ПАМ'ЯТІ ПРОФЕСОРА В.Ф. МЕЙША

Є.А. Сторожук, С.Ю. Бабич

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України



14 серпня 2025 р. виповнилося би 70 років відомому вченому-механіку, доктору фізико-математичних наук, професору Володимиру Федоровичу Мейшу.

Мейш В.Ф. народився в м. Мукачево Закарпатської області. Після закінчення середньої школи вступив на факультет кібернетики Київського державного університету ім. Т.Г. Шевченка, який закінчив у 1979 р.. Вся його трудова і наукова діяльність пов'язана з установами НАН України. З 1979 по 1990 рр. він працював на інженерних і наукових посадах в Інституті геофізики АН УРСР. У 1990 р. перейшов працювати в Інститут механіки АН УРСР (нині Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України), де активно трудився до останніх днів свого життя.

В Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України Мейш В.Ф. пройшов шлях від старшого до головного наукового співробітника. Закінчив аспірантуру при Інституті механіки АН УРСР. В 1987 р. захистив кандидатську, а в 1996 р. – докторську дисертації за спеціальністю механіка деформівного твердого тіла. Звання професора кафедри вищої математики йому присвоєно в 2001 р.

Основні наукові результати Мейш В.Ф. отримав в таких областях механіки деформівного твердого тіла: неklasичні моделі теорії неоднорідних оболонкових структур; теорія підкріплених оболонок; теорія багатошарових оболонок; розповсюдження хвиль в ґрунтових середовищах; числові методи розв'язання динамічних задач теорії оболонок і пластин; алгоритмізація обчислювальних процесів.

За період наукової діяльності він опублікував більше 450 наукових праць. Серед них 3 монографії, 5 навчальних посібників, 2 з яких мають гриф МОН України.

Мейш В.Ф. приділяв значну увагу підготовці наукових кадрів вищої кваліфікації. Під його керівництвом захищено 8 кандидатських дисертацій.

Він суміщав активну наукову роботу з викладацькою працею в провідних університетах України: Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; Національному університеті біоресурсів і природокористування України.

Протягом значного періоду часу Мейш В.Ф. виконував обов'язки вченого секретаря наукового семінару відділу динаміки і стійкості суцільних середовищ.

У 2006 р. за розробку методів визначення динамічних характеристик і напруженого стану ребристих пластин та оболонок при динамічних навантаженнях і аналіз впливу дискретного розміщення ребер Мейшу В.Ф. в складі творчого колективу присуджена премія ім. С.П. Тимошенка НАН України, а в 2015 р. за цикл наукових праць «Сучасна динаміка матеріалів та елементів конструкцій» – Державна премія України в галузі науки і техніки.

27 вересня 2021 р. Мейша В.Ф. не стало.

Всі, хто спілкувався з ним відзначають як його широку ерудицію в різних галузях знань, так і високі людські якості – доброту, щирість, готовність допомогти.

Світла пам'ять про талановитого вченого та цікаву особистість Мейша Володимира Федоровича надовго збережеться в серцях тих, хто з ним працював і спілкувався.

У 2025 році сповнюється 70 років з дня народження моїх друзів, відомих вчених-механіків Володимира Федоровича Мейша (14.08.1955-27.09.2021) та Олександра Закір'яновича Галішина (26.11.1955-29.06.2024). Починаючи з 2002 року вони були незмінними учасниками, членами оргкомітету Міжнародної наукової конференції *"Математичні проблеми технічної механіки"*.

Павло Стеблянко