

Міністерство освіти і науки України
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Національний університет цивільного захисту України
Slovak University of Technology (Словаччина)
RWTH Aachen University (Німеччина)
University of Sannio (Італія)
Polytechnic University of Valencia (Іспанія)
Warsaw University of Technology (Польща)

XI Міжнародна конференція
АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНЖЕНЕРНОЇ
МЕХАНІКИ

XI International Conference
ACTUAL PROBLEMS OF ENGINEERING
MECHANICS



ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ
ABSTRACTS OF REPORTS

Одеса, 21-23 травня 2025 року



УДК 621.01

ББК

Актуальні проблеми інженерної механіки / Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. М.Г. Сур'янінова. Одеса: ОДАБА, 2025. 234 с.

ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Ковров А.В., к.т.н., проф., заслужений діяч науки і техніки України, ректор Одеської державної академії будівництва та архітектури, член президії Академії будівництва України, віце-президент Академії енергетики України, академік Української Академії архітектури, **голова оргкомітету**;

Сур'янінов М.Г., д.т.н., проф., зав. каф. будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури, **заступник голови**;

Кровяков С.О., д.т.н., проф., проректор з наукової роботи Одеської державної академії будівництва та архітектури, **заступник голови**;

Вировой В.М., д.т.н., проф. кафедри виробництва будівельних виробів та конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури;

Горик О.В., д.т.н., проф., завідувач кафедри загальнотехнічних дисциплін Полтавської державної аграрної академії;

Клименко Є.В., д.т.н., проф., заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри залізобетонних конструкцій та транспортних споруд Одеської державної академії будівництва та архітектури;

Кононов Ю.М., д.ф.-м.н., проф., завідувач відділу теорії керуючих систем інституту прикладної математики та механіки НАН України;

Крутий Ю.С., д.т.н., проф. в.о. завідувача кафедри інформаційних технологій та прикладної математики Одеської державної академії будівництва та архітектури;

Лесечко О.В., к.ф.-м.н., доц., завідувач кафедри вищої математики Одеської державної академії будівництва та архітектури;

Мікулич О.А., д.т.н., проф. Луцького Національного технічного університету;

Отрош Ю.А. д.т.н., проф., начальник кафедри пожежної профілактики у населених пунктах Національного університету цивільної захисту України;

Суханов В.Г., д.т.н., проф., директор Архітектурно-художнього інституту Одеської державної академії будівництва та архітектури, науковий керівник НВЦ «Екострой»;

Bernd Markert, Prof. Dr.Ing., RWTH Aachen University (Germany);

Jerzy Roslon, Prof., Warsaw University of Technology (Poland);

Roman Rabenseifer, PhD, Assoc. Prof. Slovak University of Technology (Slovakia);

Fernando Jose Cos-Gayon Lopez, Prof., Polytechnic University of Valencia (Spain);

Francesco Pepe, Prof., University of Sannio (Italy).

Затверджено до друку Організаційним комітетом конференції.

ЗМІСТ

Alifov A.S., Akhmedov A.D., Askerli N.Q. REINFORCING A RECTANGULAR PLATE WITH A CIRCULAR HOLE BY MEANS OF CIRCULAR STRAP	9
Alifov A.S., Zakiyev Z.Z. MODELING AND CALCULATION OF UNDERGROUND TUNNELS UNDER VARIOUS LOADS	14
Азізова А.Г., Стрюк Р.І., Овсій Д.М., Овсій О.М. РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНИХ КОМПОНЕНТІВ ПРИ ПІДСИЛЕННІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОДНОЧАСНО В СТИСНУТІЙ І РОЗТЯГНУТІЙ ЗОНАХ ПЕРЕРІЗУ	19
Андрійчук О.В., Громов Д.Ю. ВПЛИВ ДИСПЕРСНОГО АРМУВАННЯ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРУ БЕТОНУ	23
Осадчий В.С., Анісімов К.І., Великий Д.І., Бааджи В.Г. ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРОТИЗСУВНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ГЛИБОКОГО ЗАКЛАДАННЯ	27
Багно О.М. ПРО УМОВИ ВИНИКНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ НЕСТІЙКОСТІ ГІДРОПРУЖНОЇ СИСТЕМИ: «ПІВПРОСТІР В'ЯЗКОЇ РІДИНИ – ПРУЖНИЙ ШАР, ПІДДАНИЙ СКІНЧЕННЯМ ДЕФОРМАЦІЯМ»	31
Балдук Г.П., Балдук П.Г. ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ У ПК REVIT	34
Балло Я.В., Балло В.П. ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ	36
Barabash M.S. MODELING THE CHANGING STRESS-STRAIN STATE OF CONSTRUCTIONS DURING THE LIFE CYCLE IN LIRA-FEM SOFTWARE	39
Бекірова М. М. ВПЛИВ ПОВЗУЧОСТІ ТА СТАРІННЯ НА СТІЙКІСТЬ СТРИЖНІВ	41
Bekshaev S. ON THE CONTROL OF CRITICAL FORCE OF AN ELASTICALLY SUPPORTED ROD	43
Чумаченко Т.В., Беспалова А.В., Книш О.І. ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТА ШЛЯХОМ ДОДАТКОВОЇ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕРМООБРОБКИ ПІСЛЯ ЗАТОЧКИ	48

Вербицький С.М., Макаренко О.В. ГЕОШУРУПИ: ІННОВАЦІЙНИЙ ФУНДАМЕНТ ДЛЯ СУЧАСНОГО БУДІВНИЦТВА	52
Вировой В.М., Коробко О.О., Суханов В.Г. СТРУКТУРОУТВОРЮЮЧА РОЛЬ ТРІЩИН	57
Вовк В.А. ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ТОЧНОСТІ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ КОМПОНОВОК ТА У ВИКОРИСТАННІ МОБІЛЬНИХ ПОРТАТИВНИХ ВЕРСТАТИВ АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ	61
Войтюк І.М., Мікуліч О.А., Фурс Т.В., Шемет В.Я. ВПЛИВ УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЖОРСТКИХ ПІНОПОЛІУРЕТАНІВ	63
Горб О.Г., Авраменко Ю.О. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІПСОБЕТОНУ З ОРГАНІЧНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ	66
Глухов Ю.П. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПОЛОСИ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ НА ЖОРСТКІЙ ОСНОВІ	69
Горик О.В., Ковальчук С.Б., Брикун О.М., Камишов С.С. АСПЕКТИ РУЙНУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ДРОБОСТРУМІННІ	73
Делявський М.В., Мікуліч С.Б. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ПАЯНЕ З'ЄДНАННЯ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	78
Гільчук А.В., Динник А.В. СУЧАСНІ ВИДИ ІМПЛАНТІВ ДЛЯ ЛІКТЬОВОГО СУГЛОБА СОБАК: ОГЛЯД І ПЕРСПЕКТИВИ	81
Дорошенко А.Г., Чеханюк Б.Є., Примаченко В.Ф. ПРОГНОЗНІ ОЦІНКИ ОСІДАННЯ ҐРУНТУ В ПІВДЕННИХ ТА ЦЕНТРАЛЬНИХ РЕГІОНАХ УКРАЇНИ	85
Євзеров І.Д. ПК ЛІРА 10. РОЗРАХУНКОВІ МОЖЛИВОСТІ	90
Зеленський А.Г., Слободянюк С.О. ВАРІАНТ МАТЕМАТИЧНОЇ ТЕОРІЇ БАГАТОШАРОВИХ НЕЛІНІЙНИХ ПРУЖНИХ ПЛАСТИН НЕСИМЕТРИЧНИХ СТРУКТУР ДОВІЛЬНОЇ ПОСТІЙНОЇ ТОВЩИНИ	91
Поліщук О.М., Зятюк Ю.Ю., Фурсович М.О., Супрунюк В.В., Романюк В.В. КОМБІНОВАНЕ АРМУВАННЯ, ЯК МОЖЛИВІСТЬ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ	94
Isaiev V.F. ANALYTICAL METHOD OF CALCULATING THE CHANGE IN CARBON DIOXIDE CONCENTRATION DURING THE INTERACTION OF A HUMAN MODEL AND A SUPPLY AND EXHAUST VENTILATION SYSTEM	98
Сур'янінов М.Г., Кіріченко Д.О., Сур'янінов В.М. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗРАХУНКОВИХ СХЕМ: ЦИЛІНДРИЧНИЙ КОЛОДЯЗЬ І	

ПРИЗМАТИЧНА БАЛКА НА ПРУЖНІЙ ОСНОВІ Ковальчук С.Б., Горик О.В., Яхін С.В., Брикун О.М.	103
ТОЧНИЙ АНАЛІТИЧНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ПРУЖНОГО ЗГИНУ БАГАТОШАРОВОЇ КРУГОВОЇ АРКИ ПІД ДІЄЮ НОРМАЛЬНОГО РІВНОМІРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ Козлов В.І., Лелюх Ю.І., Зінчук Л.П. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ ТРИВИМІРНИХ ШАРУВАТИХ В'ЯЗКОЕЛЕКТРОПРУЖНИХ КОНІЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З ЗАЛЕЖНИМИ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПРИ МЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ	107
Сур'янінов М.Г., Неутов С.П., Корнеєва І.Б. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ВИПРОБУВАНИХ ПЛИТАХ З ЗАЛІЗОБЕТОНУ ТА СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ Krivenko O.P., Lizunov P.P., Kalashnikov O.B.	111
UNIVERSAL THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT FOR MODELING DEFORMATION AND BUCKLING OF ELASTIC SHELL STRUCTURES UNDER THERMOMECHANICAL LOADING Крутії Ю.С., Перпері А.О., Теорло Н.А.	120
АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ БАЛКИ НА НЕОДНОРІДНИЙ ПРУЖНІЙ ОСНОВІ Крутії Ю.С., Сур'янінов М.Г., Перпері А.О., Вакулєнко В.В. ТОЧНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ЗГИНУ БАЛКИ НА ПРУЖНІЙ ОСНОВІ	124
Лук'янченко О.О., Гєращенко О.В., Костіна О.В. ІМОВІРНІСНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ЖИВУЧОСТІ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПОШКОДЖЕННЯМИ ВІД ВИБУХОВИХ ПРИСТРОЇВ	126
Майборода Р.І., Отрош Ю.А. ОЦІНКА СТІЙКОСТІ МОНОЛІТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ ТА ВИБУХУ Макаренко О.В. СУХІ БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ В РЕМОНТІ ТА ОЗДОБЛЕННІ: ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ	128
Краюшкіна К.В., Осовський І.М. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З АРМУВАННЯМ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ПОКРИТТІВ	131
Мартинюк Н.О., Мікуліч О.А. МЕТОДИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДЕФОРМАЦІЙ СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ	134
Мікуліч О.А., Сад О.В. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВІБРОПОГЛИНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІНИСТИХ ТА ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ	140
	142

Мікуліч О.А., Крадінова Т.А., Гуда О.В., Коменда Н.В. МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПОВТОРНО-ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ У ПІНИСТИХ МАТЕРІАЛАХ ЗА НАЯВНОСТІ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ	144
Пурденко Р.Р., Ковальов А.І., Дразніков Д.С. РОЗРАХУНКОВО- ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ	145
Безнюк Л.І., Романюк Є.В., Романюк В.В., Супрунюк В.В., Зятюк Ю.Ю. ЛІНІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБПИРАННЯ ПЕРФОРОВАНИХ БАЛОК НА ОГОЛОВКИ КОЛОН	150
Ромашко-Майструк О.В., Ромашко В.М. ЗАЛЕЖНІСТЬ ПРУЖНОПЛАСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТИСНУТОГО БЕТОНУ ВІД ШВИДКОСТІ ЙОГО ДЕФОРМУВАННЯ	154
Рябчиков М.Л., Александров О.В., Александров М.О., Сичов Ю.І. НЕСТАЦІОНАРНА НЕЛІНІЙНА ЗАДАЧА ВОЛОГОПЕРЕНОСУ В ПОРИСТИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛАХ	157
Середницька Х.І. ЯВИЩЕ ТЕРМІЧНОЇ РЕКТИФІКАЦІЇ У БІМАТЕРІАЛІ З ТЕПЛОПРОВІДНИМ ТРІЩИНОВАТИМ ІНТЕРФЕЙСОМ	161
Синиця Р.В., Осадчий В.С., Дмитрієв С.В. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАСІННЯ ХВИЛЬ КОНСТРУКЦІЄЮ ОГОРОДЖУВАЛЬНОЇ СПОРУДИ НЕПОВНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ	163
Фісінчук І.В., Сідней С.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ПОЖЕЖІ НА РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ В СТАЛЕВІЙ БАЛЦІ	167
Сідней С.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СКІНЧЕННО- ЕЛЕМЕНТНОЇ СІТКИ НА ТОЧНІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОБИТТЯ СТАЛЕВОЇ ПЛАСТИНИ КУЛЕЮ	171
Шаргородський О.І., Сідней С.О. ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВОЇ КОЛОНИ БЕЗ ВОГНЕЗАХИСТУ	175
Яковенко І.Е., Сотниченко В.В. ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ SIMPLE ML FOR SHEETS ДЛЯ ЗАДАЧ ВИЯВЛЕННЯ ВИРОБНИЧИХ ДЕФЕКТІВ	178
Столевич І.А., Постернак О.О., Костюк А.І., Уразманова Н.Ф. БЕТОНИ ТА КОНСТРУКЦІЇ НА ПОРИСТИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ ПІВДНЯ УКРАЇНИ	180
Сторожук Є.А., Серафимович Р.В. ДЕФОРМУВАННЯ ЗА МЕЖЕЮ ПРУЖНОСТІ ТРИШАРОВОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ З	

КРУГОВИМ ОТВОРОМ ЗА ДІЇ ОСЬОВИХ ЗУСИЛЬ	182
Сур'янінов В.М. РОЗРАХУНОК ВОДОПРОПУСКНОЇ ТРУБИ ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	185
Сорока М.М., Сур'янінов М.Г., Сур'янінов В.М. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ	188
Суханов В.Г., Вировой В.М., Суханова С.В., Чернов І.С. ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНУ	192
Твардовський І.О., Чучмай О.М., Калініна Т.О. НАУКОВИЙ СУПРОВІД ВІДНОВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНОГО ВИБУХОВОЮ ХВИЛЕЮ БАГАТОПОВЕРХОВОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ №40 ПО ВУЛ. ПРОХОРОВСЬКІЙ В М.ОДЕСА	193
Томенко В.І. РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОГО ПІДХІДУ ДО УХВАЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ ВІД ПОТРАПЛЯННЯ ЗАСОБІВ УРАЖЕННЯ	197
Trofimova L.E. TOPOLOGICAL MODELING OF CHARACTERISTIC FEATURES OF STRUCTURE FORMATION KINETICS IN DISPERSE SYSTEMS	204
Цапко Ю.В., Касянчук І.О., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю., Ющенко А.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МІКРОБІОЛОГІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ ДЕРЕВНО-ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТУ	208
Чучмай О.М. РОЗРАХУНОК СТЕРЖНЕВИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВРАХУВАННЯМ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ	212
Чучмай С.М. КОНСТРУЮВАННЯ ЖОРСТКИХ З'ЄДНАНЬ У ЗБІРНИХ КЛЕЄДОЩАТИХ КОНСТРУКЦІЯХ	216
Шамич О.М., Холодова О.С., Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П., Остапущенко О.П. НЕТРИВІАЛЬНІ ЕФЕКТИ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ ПРИ ІНФОРМАЦІЙНОМУ АНАЛІЗІ ФІЗІОЛОГІЧНИХ СИГНАЛІВ МЕХАТРОННИМИ СИСТЕМНИМИ КОМПЛЕКСАМИ КЕРУВАННЯ	220
Шамич О.М., Холодова О.С., Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П., Остапущенко О.П. БІОМЕХАНІЧНИЙ ІНЖИНІРИНГ У СПОРТІ ВИЩИХ ДОСЯГНЕНЬ: ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНТРОПІЙНИЙ ПІДХІД В АНАЛІЗІ ФІЗІОЛОГІЧНИХ СИГНАЛІВ ЗАСОБАМИ МЕХАТРОНІКИ	229
Балдук П.Г. ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ СИЛ РАМНОЇ СИСТЕМИ	233

UDC 539.386

REINFORCING A RECTANGULAR PLATE WITH A CIRCULAR HOLE BY MEANS OF CIRCULAR STRAP

Alifov A.S., Dr. Tech. Sc., Prof.

Baku Engineering University, Baku, aalifov@beu.edu.az

Akhmedov A.D., Dr. Tech. Sc., Prof.

Baku Engineering University, Baku, azehmedov@beu.edu.az

Askerli N.Q., Assistant

Azerbaijan Technological University, Ganja, naciye.9301@gmail.com

The stress state of a thin elastic rectangular plate with a circular cutout on which a circular patch of larger radius is placed is studied. The centers of the cutout and the patch coincide. The patch is attached to the plate along its entire boundary. Tensile stresses act on the boundary of the plate. Kolosov-Muskhelishvili complex potentials are found by the method of power series, the behavior of stresses on the line of connection of the patch with the plate and on the border of the cutout is investigated.

Key words: plate with cutout, Kolosov-Muskhelishvili complex potentials, boundary conditions, functions of complex variable, stress.

Let consider a thin doubly-connected domain rectangular plate with a circular hole (Fig. 1)

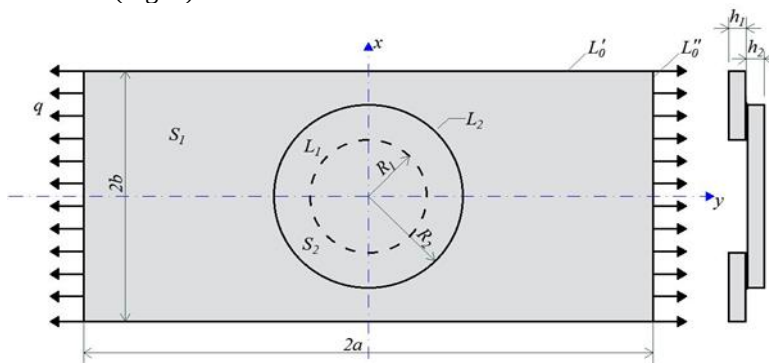


Fig. 1. Rectangular plate with a circular hole

To a thin elastic doubly-connected domain plate S_1 with a circular hole L_1 placed on the complex plane $z=x+iy$ a domain $|z| \geq R_1$, connected a thin elastic circular strap S_2 there $|z| \leq R_2$ ($R_1 \leq R_2$) that one fixed to a plate without interference and intermediate layers along own boundary $L_2: |z|=R_2$. The plate and the strap is homogenous, isotropic and having thickness, modulus of

shear and Poisson's coefficient h_1, μ_1, ν_1 and h_2, μ_2, ν_2 respectively. The plate is subjected to tension by the load of intensity q and at the boundary of the hole $L_1: |z|=R_1$ no external load is applied.

$$\sigma_r + i\tau_{r\theta} = 0 \quad t \in L_1 \quad (1)$$

$$\sigma_r + i\tau_{r\theta} = 0 \quad t \in L'_0 \quad (2)$$

$$\sigma_r + i\tau_{r\theta} = q \quad t \in L''_0$$

Along the connecting line L_2 plate with strap are satisfied condition of the equivalency of displacements of the points of them and condition of equilibrium of their points [1]

$$(u + iv)_2 = (u + iv)_1 = (u + iv)_0 \quad (3)$$

$$h_2(\sigma_r + i\tau_{r\theta})_2 + h_1(\sigma_r + i\tau_{r\theta})_1 = h_1(\sigma_r + i\tau_{r\theta})_0 \quad (4)$$

where the vector $u + iv$ is a displacement vector, lower indices 2 correspond to the strap and indices 1 – for S_1 ; $R_1 < |z| < R_2$ of the plate are on the line of connecting L_2 , and the indices with 0 to a part of $|z| > R_2$ for a plate placed outer of connecting line L_2 .

For every domains, $S_k (k = 0, 1, 2)$ the stresses $(\sigma_r, \sigma_\theta$ and $\tau_{r\theta})_k$ and derivatives of the displacement vector $u + iv$ expressed by means of two analytical functions $\Phi_k(z), \psi_k(z)$ on the corresponding domains [4,5,6].

$$(\sigma_r + \sigma_\theta)_k = 4R_e \Phi_k(z) \quad (5)$$

$$(\sigma_r + i\tau_{r\theta})_k = \Phi_k(z) + \overline{\Phi_k(z) - z\Phi'_k(z) - z^{-1}z\overline{\Psi'_k(z)}} \quad (6)$$

$$2\mu_k \frac{\partial}{\partial \theta} (u + iv)_k = iz[\kappa_k \Phi_k(z) - \overline{\Phi_k(z)} + \overline{z\Phi'_k(z) + z^{-1}z\overline{\Psi'_k(z)}}]$$

(7)

$$2\mu_k \frac{\partial}{\partial r} (u + iv)_k = e^{i\theta} [\kappa_k \Phi_k(z) - \overline{\Phi_k(z)} - r\overline{\Phi'_k(z)} - e^{-i\theta} \overline{\Psi'_k(z)}]$$

(8)

$$z \in S_k; \kappa_0 = \kappa_1 = \kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu);$$

$$\kappa_1 = (3 - \nu_v) / (1 + \nu_2);$$

$$\mu_0 = \mu_1 = \mu$$

According to the conditions (1), (2) and (3) and formulae (4)-(7) on the curcumerferences L_1 and L_2 we obtain the following boundary conditions:

$$\Phi_1(t) + \overline{\Phi_1(t)} - t\overline{\Phi'_1(t)} - \frac{t}{t} \Psi_1(t) = 0 \quad t \in L_1 \quad (9)$$

$$\Phi_1(t) + \overline{\Phi_1(t)} - t\overline{\Phi'_1(t)} - \frac{t}{t} \Psi_1(t) = 0 \quad t \in L'_0 \quad (10)$$

$$\Phi_1(t) + \overline{\Phi_1(t)} - t\overline{\Phi_1'(t)} - \overline{\frac{t}{t} \Psi_1(t)} = q \quad t \in L_0'' \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{\mu_2} \left[\kappa_2 \Phi_2(t) - \overline{\Phi_2(t)} + t\overline{\Phi_2'(t)} + \overline{\frac{t}{t} \Psi_2(t)} \right] - \kappa \Phi_1(t) - \\ \overline{\Phi_1(t)} + t\overline{\Phi_1'(t)} + \overline{\frac{t}{t} \Psi_1(t)} = \kappa \Phi_0(t) - \overline{\Phi_0(t)} + \\ t\overline{\Phi_0'(t)} + \overline{\frac{t}{t} \Psi_0(t)} \quad t \in L_2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{h_2}{h_1} \left[\Phi_2(t) + \overline{\Phi_2(t)} - \overline{\Phi_2'(t)} - \overline{\frac{t}{t} \Psi_2(t)} \right] + \Phi_1(t) + \\ \overline{\Phi_1(t)} - t\overline{\Phi_1'(t)} - \overline{\frac{t}{t} \Psi_1(t)} = \Phi_0(t) + \overline{\Phi_0(t)} - \\ t\overline{\Phi_0'(t)} - \overline{\frac{t}{t} \Psi_0(t)} \quad t \in L_2 \end{aligned} \quad (13)$$

Complex potentials on the domains S_k ($k = 0, 1, 2$) we represent as a Laurent series

$$\Phi_0(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_{k_0} \left(\frac{z}{d} \right)^k + \sum_{k=1}^{\infty} b_{k_0} \left(\frac{R_2}{z} \right)^k \quad (14)$$

$$\Phi_1(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_{k_1} \left(\frac{z}{R_2} \right)^k + \sum_{k=1}^{\infty} b_{k_1} \left(\frac{R_1}{z} \right)^k \quad (15)$$

$$\Phi_2(z) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{k_2} \left(\frac{z}{R_2} \right)^k \quad (16)$$

$$\Psi_2(z) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{k_2} \left(\frac{z}{R_2} \right)^k \quad (17)$$

$$\Psi_0(z) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{k_0} \left(\frac{z}{d} \right)^k + \sum_{k=1}^{\infty} B_{k_0} \left(\frac{R_2}{z} \right)^k \quad (18)$$

$$\Psi_1(z) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{k_1} \left(\frac{z}{R_2} \right)^k + \sum_{k=1}^{\infty} B_{k_1} \left(\frac{R_1}{z} \right)^k \quad (19)$$

By transformation (14 ÷ 19) by corresponding variables and then substituting them in Laurent series (14 ÷ 19) and then this Laurent series involved to corresponding ultimate conditions (9), (12) and (13) and comparing coefficients with the same powers we obtain infinity sistem of linear algebraic equations for unknown coefficients to Laurent series (14 ÷ 19)[1,7,8].

Furthermore, for boundary conditions $L'_0 + L''_0$ we apply projection method. For this by multiplying boundary conditions (10 ÷ 11) to core of Cauchy and integrating along the contour L'_0 and L''_0

$$\int_{L'_0} \left[\Phi_1(t) + \overline{\Phi_1(t)} - t\overline{\Phi'_1(t)} - \frac{t}{t} \overline{\Psi_1(t)} \right] \frac{dt}{t-z} = 0 \quad (20)$$

$$\int_{L''_0} \left[\Phi_1(t) + \overline{\Phi_1(t)} - t\overline{\Phi'_1(t)} - \frac{t}{t} \overline{\Psi_1(t)} - q \right] \frac{dt}{t-z} = 0 \quad (21)$$

Transforming the core of Cauchy $\frac{1}{t-z}$ in the boundary integral relations (20) and (21) we obtain a set of equations

$$\int_{L'_0} \left[\Phi_1(t) + \overline{\Phi_1(t)} - t\overline{\Phi'_1(t)} - \frac{t}{t} \overline{\Psi_1(t)} \right] t_0^n dt = 0 \quad (n=0, 1, 2) \quad (22)$$

$$\int_{L''_0} \left[\overline{\Phi_1(t)} + \Phi_1(t) - t\overline{\Phi'_1(t)} - \frac{t}{t} \overline{\Psi_1(t)} - q \right] \cdot t^n dt = 0 \quad (n=0, 1, 2) \quad (23)$$

Tranforming in (22) and (23) to conjugate quantities we obtain a different set of equations

$$\int_{L'_0} \left[\overline{\Phi_1(t)} + \Phi_1(t) - t\overline{\Phi'_1(t)} - \frac{t \cdot \Psi_1(t)}{\bar{t}} \right] t_0^n dt = 0 \quad (n=0, 1, 2) \quad (24)$$

$$\int_{L''_0} \left[\overline{\Phi_1(t)} + \Phi_1(t) - t\overline{\Phi'_1(t)} - \frac{t \cdot \Psi_1(t)}{\bar{t}} - q \right] \cdot t^n dt = 0 \quad (n=0, 1, 2) \quad (25)$$

By adding (24) and (25) to obtained infinity system of linear algebraic equation by reducing and then solving together we find unknown coefficients of functions (14 ÷ 19) and then by means of formulae (5 ÷ 8) we compute stress and displacement components of the characteristic points of the rectangular plate.

References

- [1] Muskhelishvili N. I. Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity, Springer. 1977, 763 p.

- [2] Timoshenko S. and Goodies N. Theory of Elasticity. New York, Toronto. London, MCGRAW-Hill BOOK COMPANY, Inc., 1951, 263 p.
- [3] Murakami Yukitaka. Theory of Elasticity and Stress Concentration. Tolan Wiley, 2017, 474 p
- [4] Silvestrou V.V. Stress-strain state near a straight-through transverse crack tip in a special multi-sheet plate structure, International Journal of Fracture, 1997.v. 84, N3, p. 229-236
- [5] Землянова А.Ю., Сильвестров В.В. Задача о круглой заплатке. Прикладная математика и механика. 2005, т. 69, вып. 4
- [6] Землянова А.Ю. Метод степенных рядов в задачах о круговой заплатке. Труды математического центра имени Н.И. Лобачевского, т.18, Казань 2002, с.31-32
- [7] Silvestrov V.V. Stress-strain state near a straight-through transverse crack tip in a special multi-sheet plate structure. International Journal of Fracture.1997. v. 84. N3. p. 229-236.
- [8] Engels H., Zakharov D., Becker W. The plane problem of an elliptically reinforced circular hole in an anisotropic plate or laminate , Archive of Applied Mathematics. 2001. v.71. p. 601-612.
- [9] Tsamasphyros GJ., Fumarakis N. K., Kanderakis G.N., Marioli-Riga Z.P. Computational analysis and optimization for smart patching repairs , Applied ' Composite Materials. 2003.v.10. p. 141-148.
- [10] Wang Gul-Fang. Stress analysis of plates with a circular hole reinforced by flange reinforcing member , Applied Mathematics and Mechanics.1987.v. 8. № 6.p. 569-588.

УСИЛЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ С КРУГЛЫМ ОТВЕРСТИЕМ КРУГОВОЙ ЗАПЛАТКОЙ

В данном исследовании рассматривается распределение напряжений в тонкой упругой прямоугольной пластине с круглым вырезом, усиленной круговой заплаткой большего радиуса, причем центры выреза и заплатки совпадают. Пластина подвергается равномерному растяжению по ее внешнему контуру, при этом на границе выреза внешние силы отсутствуют. С использованием комплексных потенциалов Колосова-Мухелишвили и метода степенных рядов анализируется напряженное состояние вблизи выреза и на границе соединения заплатки с пластиной. Формулируются условия непрерывности перемещений и равновесия напряжений на границе соединения, что приводит к системе линейных алгебраических уравнений для неизвестных коэффициентов разложения комплексных потенциалов в ряд Лорана. Дополнительно применяются интегральные представления граничных условий, которые решаются методом проекций для повышения точности вычислений. Полученные результаты позволяют оценить перераспределение напряжений и снижение концентрации напряжений за счет усиления, что имеет важное значение для применения в конструкциях аэрокосмической, машиностроительной и строительной отраслей.

UDC 539.386

MODELING AND CALCULATION OF UNDERGROUND TUNNELS UNDER VARIOUS LOADS

Alifov A.S., Dr. Tech. Sc., Prof.

Baku Engineering University, Baku, aalifov@beu.edu.az

Zakiyev Z. Z.

Azerbaijan University of Architectural and Construction, Baku, zamirzakiyev@yahoo.com

The mathematical model of the stress state formation of a circular tunnel constructed near a slope under the action of gravitational forces is described. The model is based on the principle of joint operation of the tunnel lining and the rock mass as elements of a single deformable system. The corresponding plane problem of the theory of elasticity has been formulated and its analytical solution has been obtained by methods of complex variable functions theory.

Key words: mathematical modeling, rock massif, tunnel, plane problem, theory of elasticity, functions of complex variable, Laurent series.

The stress state of a thin elastic rectangular plate with a circular cutout on which a circular patch of larger radius is placed is studied. The centers of the cutout and the patch coincide. The patch is attached to the plate along its entire boundary. Tensile stresses act on the boundary of the plate. Kolosov-Muskhelishvili complex potentials are found by the method of power series, the behavior of stresses on the line of connection of the patch with the plate and on the border of the cutout is investigated.

At designing of excavations of various purposes, constructed by mining near the inclined earth surface, there is a necessity of theoretical substantiation of stability of excavations under the action of own weight of soils.

Below is a description of the mathematical model of the stress-strain state of the rock massif around the excavation, passed in close proximity to the slope. The developed model is based on analytical solutions of the corresponding elasticity theory problems on the equilibrium of a weighted elastic half-plane weakened by a circular hole.

Problem formulation in the theory of elasticity. Boundary conditions Fig. 1 shows the computational scheme of the equilibrium problem formulation description of a linearly deformable semi-infinite medium reinforced by a ring of another material.

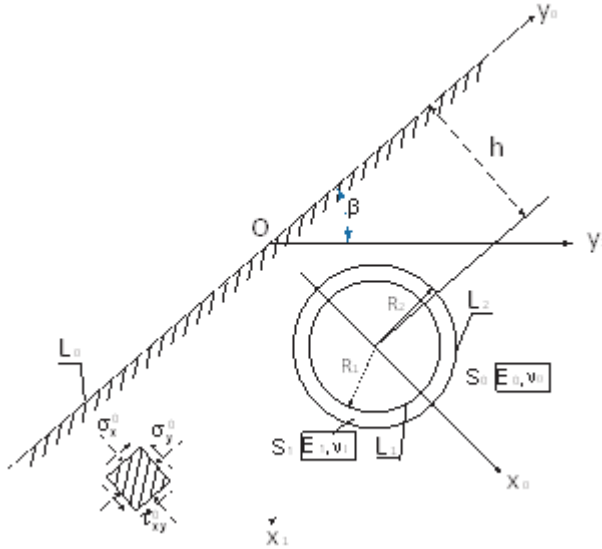


Fig. 1. The computational scheme of the equilibrium problem formulation

The problem considers a weighted medium; the action of the rocks' own weight is taken into account by the initial stress field with components:

$$\begin{cases} \sigma_x^{(0)} = \alpha^* \cdot \gamma \cdot x^0 \cdot \cos\beta \\ \sigma_y^{(0)} = \lambda \cdot \alpha^* \cdot \gamma \cdot x^0 \cdot \cos\beta \\ \tau_{xy}^{(0)} = \alpha^* \cdot \gamma \cdot x^0 \cdot \sin\beta \end{cases} \quad (1)$$

where γ - the specific gravity of rocks;

h - depth of excavation;

λ - lateral pressure coefficient determined experimentally;

x^0 - ordinate in the inclined system X^0OY^0 coordinates;

α^* - correction coefficient introduced for approximate accounting of the influence of the distance of the lining construction from the tunnel face;

β is the angle of inclination of the ground surface to the horizon.

In the problem, the total stresses $\sigma_x^{(0)*}$, $\sigma_y^{(0)*}$, $\tau_{xy}^{(0)}$ in the S_0 medium are represented as sums:

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(0)*} &= \sigma_x^{(0)} + \sigma_x^{(h)} \\ \sigma_y^{(0)*} &= \sigma_y^{(0)} + \sigma_y^{(h)} \\ \tau_{xy}^{(0)*} &= \tau_{xy}^{(0)} + \tau_{xy}^{(h)} \end{aligned} \quad (2)$$

where - $\sigma_x^{(h)}, \sigma_y^{(h)}, \tau_{xy}^{(h)}$, the required additional stresses in the S_0 domain due to the presence of the hole.

In the computational scheme of the problem (Fig. 1), the linearly deformed semi-infinite

domain is reinforced near the rectilinear boundary L_0 by a ring with contours L_1 and L_2

with corresponding radiuses R_1 and R_2 .

The boundary conditions of the problem are as follows:

$$\sigma_x^{(h)} = 0, \tau_{xy}^{(h)} = 0 \quad \text{на } L_0 \quad (3)$$

$$\sigma_r^{(h)} = 0, \tau_{r\theta}^{(h)} = 0 \quad \text{на } L_1 \quad (4)$$

The solutions of the posed problems in the theory of elasticity are obtained using the mathematical apparatus of the theory of functions of a complex variable, which has been well tested in the works [9–11].

We introduce in the domain the complex potentials $\phi_j(z), \psi_j(z)$ ($j=0,1$) Kolosov-Muskhelishvili, which are related to the stress components by the known formulas [7]:

$$\sigma_r^{(j)} + \sigma_\theta^{(j)} = 4\operatorname{Re}\phi_j'(z) \quad (5)$$

$$\sigma_\theta^{(j)} - \sigma_r^{(j)} + 2i\tau_{r\theta}^{(j)} = 2[\bar{z}\phi_j''(z) + \psi_j'(z)]e^{2i\theta} \quad (6)$$

$$2\mu_j(u(j)+v(j)) = [\bar{z}\phi_j'(z) - \overline{z\phi_j'(z)} - \overline{\psi_j(z)}]e^{-i\theta} \quad (7)$$

The Kolosov-Muskhelishvili complex potentials $\phi_j(z), \psi_j(z)$ ($j=0,1$) are determined from the following boundary conditions:

$$\phi_0(t) + \overline{t\phi_0'(t)} + \overline{\psi_0(t)} = 0 \quad \text{на } L_0 \quad (8)$$

$$\phi_1(t) + \overline{t\phi_1'(t)} + \overline{\psi_1(t)} = \phi_0(t) + \overline{t\phi_0'(t)} + \overline{\psi_0(t)} + f_2(t) \quad \text{на } L_2 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_1\phi_1(t) - \overline{t\phi_1'(t)} - \overline{\psi_1(t)} &= \frac{\mu_1}{\mu_0} \left[\bar{\alpha}_0\phi_0(t) - \overline{t\phi_0'(t)} - \overline{\psi_0(t)} \right] \quad \text{на } L_2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\phi_1(t) + \overline{t\phi_1'(t)} + \overline{\psi_1(t)} = 0 \quad \text{на } L_1 \quad (11)$$

where $\bar{\alpha}_j = 3 - 4\nu_j$; $\mu_j = \frac{E_j}{2(1+\nu_j)}$

Here, the function $f_2(t)$ is defined depending on the type of loading considered.

Analytical solutions of the problems were obtained using the method of analytical continuation of complex potentials through the boundary of the half-plane, using the properties of Cauchy integrals and Laurent series.

The peculiarity of the solution for each of the posed problems for a semi-infinite domain is its reduction to the solution of the corresponding problem on the equilibrium of a full plane reinforced by a ring, with boundary conditions on the contours of the ring L_1 and L_2 , containing additional terms responsible for the influence of the inclined boundary [10,11].

The Kolosov-Muskhelishvili complex potentials $\varphi_0(z)$, $\psi_0(z)$ in the S_0 region under the action of the self-weight will have the form:

$$\begin{aligned}\varphi_0(z) &= \varphi_0^*(z) - \frac{K_0}{1 + \alpha_0} (\ln z + \alpha_0 \ln(z - h)) \\ \psi_0(z) &= \psi_0^*(z) + \frac{\overline{K_0}}{1 + \alpha_0} (\ln z + \alpha_0 \ln(z - h))\end{aligned}\quad (12)$$

$$\text{where } K_0 = \frac{\gamma \alpha^* R_2^2}{2} e^{i\beta}$$

Let us represent the Kolosov-Muskhelishvili complex potentials $\varphi_0^*(z)$, $\psi_0^*(z)$ as a sum of two functions regular in the half-plane and outside the contour L_2 , respectively

$$\begin{aligned}\varphi_0^*(z) &= \varphi_0^{**}(z) + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \left(\frac{R_2}{z - h} \right)^k \\ \psi_0^*(z) &= \psi_0^{**}(z) + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \left(\frac{R_2}{z - h} \right)^k\end{aligned}\quad (13)$$

$\varphi_0^{**}(z)$, $\psi_0^{**}(z)$ -analytic functions in the half-plane after satisfying the boundary condition on the sloping boundary L_0 will have the form:

$$\begin{aligned}\varphi_0^{**}(z) &= -K_0 \frac{z}{z + h} - \sum_{k=1}^{\infty} A_k (-1)^k \left(\frac{R_2}{z + h} \right)^k \\ &+ z \sum_{k=1}^{\infty} a_k k (-1)^{k+1} R_2^k \left(\frac{1}{z + h} \right)^{k+1}\end{aligned}\quad (14)$$

$$\psi_0^{**}(z) = z \varphi_0^{**'}(z) + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \left(\frac{R_2}{z + h} \right)^k \quad (15)$$

Substitution of the representations (13)-(15) into the boundary conditions (9)-(11) allows us to obtain relations between the coefficients of complex potentials characterizing the stress-strain state of adjacent regions, in power series and finally come to an infinite system of linear algebraic equations with respect to the coefficients of complex potentials in the domain S_0 . Thus, it is possible to calculate the coefficients of complex potentials in each of the regions S_0 and S_1 , which allows us to determine the stress components at the points of the considered domains, applying the Kolosov-Muskhelishvili formulas [4].

- [1] Timoshenko S. and Goodies N. Theory of Elasticity. New York, Toronto. London, MCGRAW-Hill BOOK COMPANY, Inc., 1951, 263 p.
- [2] Zhao G.S., Zhong G.R., Zhu F.P., Liang H.C. Analysis of stratum grouting influence on shaft lining stress with the methods of simulation and in site measurements. Proc. Earth and Planetary Science, 2009, pp. 497–502.
- [3] Fotieva N.N., Sammal' A.S. Evaluation of opening stability with rocks technological heterogeneity being taken into account. Proc. Conf. "Geomechanics 93", Ostrava, 1993, pp. 189–192.
- [4] Muskhelishvili N. I. Some basic problems of mathematical elasticity theory. Moscow, Nauka Publ., 1969. 700 p.
- [5] Fotieva N.N., Bulychev N.S., Sammal A.S. Design of shallow tunnel linings / Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering. EUROCK'96 / Torino/Italy. A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield. 1996. p.p.677-680.
- [6] Osetrova O.V., Bulychev N.S. Berechnung von den Rohren, die im Boden durchs Verfahren ohne Transcheen gelegt werden.// Proc. of the 4 –th Int. Conf. - Ostrava. Czech Rep. - 1999.
- [7] Aramanovich I. G. On stress distribution in an elastic half-plane weakened by a supported circular opening, DAN SSSR, Moscow, 1955, vol. 104, no. 3, pp. 372 – 375.
- [8] Sammal A. S. and Knyazeva S. V. Designing multilayered lining of the tunnel, constructed near the slope on the action of rocks own weight, Izv. TulGU, Ser. Geomechanics. Mechanics of underground structures, Tula, 2004, Issue. 2, pp. 3 – 11.
- [9] Korneeva N. N. Designing tunnel lining, constructed near the slopes, on the action of its own weight of rock, GIAB, 2000, no. 10, pp. 106 – 109.
- [10] Bulychev N. S. The mechanics of underground structures in examples and tasks, Textbook for high schools, Moscow, Nedra, 1989, 270 pp.
- [11] Antsiferov S. V. Method for calculating multi-layer lining of parallel tunnels of a circular cross-section of shallow ground: a monograph, Tula, Publishing House of Tula State University, 2014, 298 pp.
- [12] Sammal A. S., Antsiferov S. V., and Deev P. V. Analytical methods for calculating underground structures: monograph. Tula, Publishing House of Tula State University, 2013, 111 pp.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ПОДЗЕМНЫХ ТОННЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАГРУЗКАХ

Математическая модель описывает напряженное состояние кругового тоннеля, построенного рядом со склоном под действием гравитации, при совместной работе крепи и массива горных пород. Задача сформулирована в рамках теории упругости и решена методами теории функций комплексного переменного. В расчетной модели учитывается равновесие нагруженной полуплоскости ослабленной круговым отверстием, при действии собственного веса массива горных пород. Решение получено с использованием потенциалов Колосова-Мусхелишвили и рядов Лорана, что в свою очередь дает возможность определить распределение напряжений в исследуемой области.

УДК 624.012.4: 69.059.3: 539.413

РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНИХ КОМПОНЕНТІВ ПРИ ПІДСИЛЕННІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОДНОЧАСНО В СТИСНУТІЙ І РОЗТЯГНУТІЙ ЗОНАХ ПЕРЕРІЗУ

Азізова А.Г., аспірантка, Стрюк Р.І., аспірант,
Овсій Д.М., Ph.D, ст. викладач, Овсій О.М., провідний фахівець
Національний університет “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”,
м. Полтава

Розрахунок конструктивних компонентів (елементів) підсилення збірних залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки чи поздовжніх арматурних стержнів виконуємо при забезпеченні умов міцності на згин в їх розрахункових перерізах:

$$M = f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x) + f_{sd} A_{sd} \times (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x) + f'_s A'_s \times (0,5x - a_s), \quad (1)$$

де M – згинальний момент в розрахункових перерізах залізобетонного балкового елементу від дії зовнішніх навантажень на ділянці згину;
 d - товщина додаткового залізобетонного шару набутування при підсиленні залізобетонного балкового елементу шляхом нарощування

його перерізів; h_0 – робоча висота перерізу залізобетонного балкового елементу, що підсилюється; f_s – розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури відповідно п.3.2 норм [1] залежно від її класу, якою армована нижня розтягнута зона залізобетонного балкового елементу; f'_s – розрахунковий опір на стиск поздовжньої арматури відповідно п.3.2 норм [1] залежно від її класу, якою буде виконане армування верхньої стиснутої зони додаткового залізобетонного шару набутування, яких здійснюється підсилення; f_{sd} – розрахунковий опір на розтяг горизонтального елементу шпренгельної затяжки чи додаткових арматурних стержнів відповідно норм [2]; a_0 – відстань між геометричними горизонтальними осями існуючої поздовжньої арматури і горизонтальним елементом шпренгельної затяжки (A_{sd}), яка приймається в рівнянні зі знаком «+» при $h_0 + a_0 \geq h_0$ та зі «-» знаком при $h_0 - a_0 < h_0$; A_s – сумарна площа перерізу поздовжніх арматурних стержнів, які встановлені в розтягнутій зоні перерізу залізобетонного балкового елементу, що підсилюється; A_{sd} – сумарна площа перерізу поздовжніх горизонтальних елементів шпренгельної затяжки чи додаткових арматурних стержнів (A_a), якими додатково здійснюється армування залізобетонного балкового елементу, що підсилюється в розтягнутій зоні перерізу; A'_s – сумарна площа перерізу поздовжніх арматурних стержнів, котрими здійснюється армування додаткового залізобетонного шару набетонування в стиснутій зоні перерізу залізобетонного балкового елементу, що підсилюється; x – висота стиснутої зони бетону в розрахунковому комбінованому тавровому перерізі залізобетонного балкового елементу на рівні плитної ділянки (див. розрахункову схему на рис. 1), що сприймає навантаження від згинального моменту (M), яка визначається за залежністю:

$$x = (f_s A_s + f_{sd} A_{sd} + f'_s A'_s) / (f_{cl} b), \quad (2)$$

де f_{cl} – розрахунковий опір на стиск важкого бетону відповідно п.3.1 норм [1] залежно від його класу, із якого буде виготовлений (улаштований) додатковий залізобетонний шар набетонування при підсиленні залізобетонного балкового елементу; b – розрахункова ширина комбінованого перерізу підсилення залізобетонного балкового конструктивного елементу, яка при розрахунковому тавровому приведеному перерізі дорівнює $b = b_f$.

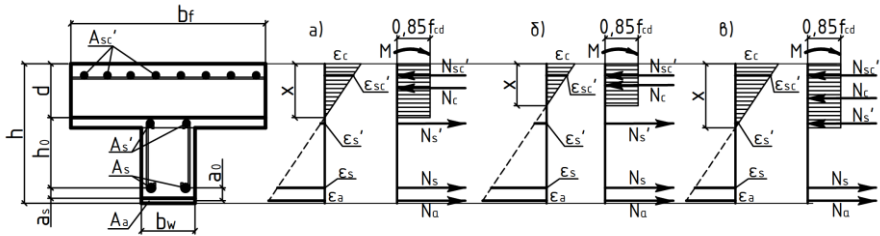


Рис. 1 Випадки напружено-деформованого стану приведенного комбінованого таврового перерізу залізобетонного балкового елемента, що підсилюються шляхом нарощування перерізу додатковим залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки чи додаткових поздовжніх арматурних стержнів

В умові рівноваги (1) невідомими є величини d , A_{sd} , x , A_s' , що ускладнює розрахунок оптимальних (ефективних) їх параметрів при визначених величинах зовнішнього навантаження і міцносних характеристиках матеріалів компонентів підсилення і залізобетонного балкового елемента. Із рівняння рівноваги (1) при $A_s' = 0$ і прийнятті однієї із невідомих величин його складових: товщини додаткового залізобетонного шару набетонування (d) чи площі поперечного перерізу поздовжнього елемента шпренгельної затяжки (A_{sd}), шляхом перетворень можемо отримати наступні залежності, за допомогою яких можемо визначити одну із невідомих величин d чи A_{sd} :

$$A_{sd} = \frac{f_c b}{f_{sd}} \times (-2M + f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x_h) - (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x_h) \times (1 \pm d \pm a_0 - 0,5x_h); \quad (3)$$

$$d = \frac{M \pm f_{sd} A_{sd} \cdot a_0}{f_s A_s + f_{sd} A_{sd}} - h_0 - \frac{f_s A_s + f_{sd} A_{sd}}{2 f_c b}, \quad (4)$$

де x_h – висота стиснутої зони бетону в розрахунковому комбінованому перерізі на ділянці залізобетонного балкового елемента, що сприймає навантаження від згинального моменту (M), при армуванні його тільки існуючими арматурними стержнями в розтягнутій зоні загальною площею A_s , яка визначається за залежністю:

$$x_h = (f_s A_s) / (f_c b). \quad (5)$$

Розрахунок невідомих величин d і A_{sd} відповідно за залежністю (3) чи (4) не завжди буде оптимальний (ефективний з економічної точки зору), тому що в окремих випадках при нарощуванні перерізу шляхом набетонування

встановлення додаткового армування в розтягнутій зоні перерізу може бути непотрібне, бо буде достатньо вже існуючої в ній площі армування (A_s). Тому для удосконалення методики розрахунку компонентів підсилення був запропонований додатковий коефіцієнт (n), який буде враховувати відношення площ армування A_{sd} до A_s .

$$n = A_{sd} / A_s. \quad (6)$$

Величину коефіцієнта n визначаємо за залежностями (7)-(9):

$$0,5x_H \cdot n^2 + (h_0 + d \pm a_0 + x_H) \cdot n + (h_0 + d + 0,5x_H - \frac{M}{f_s A_s}) = 0; \quad (7)$$

$$D = (h_0 + d \pm a_0 + x_H)^2 - 4 \times 0,5x_H \times (h_0 + d + 0,5x_H - \frac{M}{f_s A_s}); \quad (8)$$

$$n_{1,2} = \frac{-(h_0 + d \pm a_0 + x_H) \pm \sqrt{D}}{x_H}. \quad (9)$$

При $n \leq 0$ підсилення залізобетонної балкового елементу одночасно шляхом нарощування перерізу в стиснутій і розтягнутій зонах непотрібне, буде достатньо виконати підсилення елементу тільки в стисненій його зоні шляхом улаштування додаткового залізобетонного шару набетонування.

При $n > 0$ площа перерізу поздовжнього горизонтального елементу зтяжки чи додаткових арматурних стержнів буде становити:

$$A_{sd} = (n + 0,1) \times A_s. \quad (10)$$

Визначаємо величину необхідної площі армування (A'_s) залізобетонного шару набетонування в комбінованому перерізі балкового елементу за умови рівноваги при забезпеченні умов міцності на згин відносно рівнодіючої вісі поздовжнього армування в його розтягнутій зоні:

$$A'_s = \frac{M - f_c b x \times (h_0 + d - 0,5x)}{f_s \times (h_0 + d - a')}. \quad (11)$$

При величині площі армування верхньої стиснутої зони менше нуля ($A'_s \leq 0$), армування виконуємо конструктивно. При $A'_s > 0$ виконуємо корегування величини площі перерізу поздовжнього елементу зтяжки з урахуванням величин розрахункових опорів на розтяг існуючих арматурних стержнів (f_s) і поздовжнього горизонтального елементу шпренгельної зтяжки чи додаткових арматурних стержнів (f_{sd}), що проєктуються, за залежністю:

$$A_{sd} = f_s / f_{sd} \times (A_s \times (n + 0,1) + A'_s). \quad (12)$$

Виконуємо перевірку несучої здатності перерізу залізобетонного балкового елементу, що підсилюється, при забезпеченні умови міцності на згин в його розрахункових перерізах, відносно рівнодіючої вісі стисненої зони бетону за залежністю:

$$M \leq f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x) + f_{sd} A_{sd} \times (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x) + f_s A'_s \times (0,5x - a'_s). \quad (13)$$

[1]. ДБН В.2.6-98:2009 зі Зміною №1. Бетонні і залізобетонні конструкції. Основні положення / Наказ Мінрегіонбуду України від 24.12.2009 р. № 680, введені в дію з 01.07.2011 р., зміни чинні з 01.06.2020 р. – К.: Мінрегіон України, 2020. – 71 с.

[2]. ДБН В.2.6-198:2014 зі Зміною №1. Сталеві конструкції. Норми проектування / Наказ Мінрегіону України від 10.06.2014 р. №167, чинні з 01.01.2015 р. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 205 с.

CALCULATION OF STRUCTURAL COMPONENTS WHEN STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE BEAM ELEMENTS SIMULTANEOUSLY IN COMPRESSED AND TENSILE ZONES OF THE CROSS-SECTION

The proposed algorithm for calculating the structural components of reinforced concrete beam elements can be used in the calculation and design of strengthening of prefabricated reinforced concrete beams and slabs, and beam elements of monolithic reinforced concrete floors of buildings and structures during their reconstruction, revitalization or restoration in case of damage.

УДК 624.012.45:666.97:539.3

ВПЛИВ ДИСПЕРСНОГО АРМУВАННЯ НА ФІЗИКО- МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРУ БЕТОНУ

Андрійчук О. В., к.т.н., доц., Громов Д. Ю., аспірант

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

Застосування бетону в сучасному будівництві потребує підвищення його фізико-механічних характеристик – міцності, тріщиностійкості та ударної в'язкості. Перспективним напрямом удосконалення цих характеристик для бетонної матриці є дисперсне армування, при якому короткі волокна рівномірно розподіляються в цементній матриці. Такий підхід забезпечує

ефективний перерозподіл напружень, зменшення тріщиноутворення і підвищенню надійності конструкцій. Різні типи волокон (сталеві, базальтові, скляні та поліпропіленові) змінюють фізико-механічні властивості бетону, забезпечують рівномірний розподіл напружень і підвищують міцність конструкцій. Вони також впливають на структуру цементної матриці, підвищуючи її стійкість до агресивних хімічних речовин.

Ефективна передача напружень у фібробетоні можлива за умови, що модуль пружності волокон перевищує модуль матриці. Низькомодульні волокна (поліпропілен, нейлон) підвищують енергоємність і пружність композиту, тоді як високомодульні (сталь, скло, вуглець) – його міцність і жорсткість. Основним фактором що забезпечує «роботу» фібробетону є якісний зв'язок між бетонною матрицею та армувальними волокнами [1].

Загальновідомо, що сталеві волокна ефективніше підвищують міцність бетону на згин порівняно зі стиском, розтягом або сколюванням. Сталефібробетон також має підвищену стійкість до вибухових навантажень.

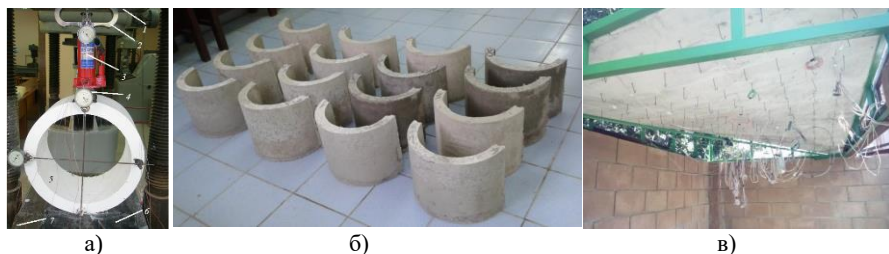


Рис.1. Дослідження СФБ-конструкцій в Луцькому НТУ [2]

а) – безнапірні труби; б) – лотки для водовідведення; в) – оболонки-гіпари

Оптимальним рішенням є поєднання сталеві фібри з армувальними стрижнями – комбіноване армування. Це зменшує тріщиноутворення, підвищує надійність конструкцій і дозволяє частково замінити арматуру [3].

Додатковим методом підвищення ефективності фібробетонних конструкцій є контрольована орієнтація сталевих волокон, що значно збільшує здатність бетону зв'язувати тріщини та запобігає їх розкриттю [4].

Варто зазначити, що полімерні волокна застосовуються для підвищення тріщиностійкості, ударної в'язкості та експлуатаційної довговічності бетону. Вони знижують утворення усадкових тріщин на ранніх стадіях твердіння та покращують його стійкість до стирання, а також не піддаються корозії.

Базальтові волокна підвищують міцність бетону на розтяг і згин, зменшують його водопоглинання та підвищують морозостійкість бетону. Модифіковане базальтове волокно [5] сприяє утворенню продуктів гідратації

клинкерних мінералів на своїй поверхні, що забезпечує підвищення зчеплення волокон із цементною матрицею [6].

Вуглецеві волокна характеризуються надзвичайно високим модулем пружності, міцністю на згин та корозійною стійкістю [1]. У складі бетону ці волокна забезпечують створення надміцних і легких конструкцій із високою здатністю до розтягу, що є особливо важливим для відновлення та ремонту споруд, мостів і захисних конструкцій, зокрема в агресивних умовах.

Скловолокно знижує рухливість бетонної суміші через велику площу взаємодії тонких волокон із в'язучим, що підвищує внутрішній опір і зменшує усадку. Скловолокна також зменшують водопоглинання та проникність агресивних середовищ, запобігають утворенню мікротріщин і підвищують довговічність конструкцій в умовах морського середовища [7]. Зазначені властивості забезпечуються ефективною адгезією скловолокон [8].

Перспективним напрямком розвитку високоміцних фібробетонних конструкцій є використання наномодифікованого бетону з фібровим армуванням. Відповідно до результатів мікроскопічного аналізу зразків, зруйнованих під дією ударних навантажень [9], спостерігається однорідна структура затверділої матриці, зміцнений зв'язок між цементним каменем і заповнювачем, а також різноспрямована орієнтація рівномірно розподілених волокон. Такі структурні особливості сприяють гальмуванню розвитку тріщин і підвищують ефективність роботи композиту.

Варто зазначити, що різні типи волокон по-різному впливають на фізико-механічні та фізико-хімічні властивості бетону. Сталеві волокна підвищують міцність на згин і розтяг, ударостійкість та енергопоглинання, але потребують захисту від корозії. Вуглецеві волокна забезпечують зниження маси, високу міцність і втомну стійкість конструкції. Скловолокно зменшує ширину розкриття тріщин, покращує жорсткість і знижує водопоглинання. Поліпропіленові волокна запобігають пластичним і усадковим тріщинам, підвищують в'язкість, зносостійкість і пожежну безпеку. Базальтові волокна покращують морозо- й термостійкість, зменшують деформації та покращують зчеплення фібр із цементною матрицею.

Усі представлені в публікації типи волокон ущільнюють мікроструктуру бетонної матриці та сприяють рівномірному розподілу напружень.

- [1]. Awoyera P. O., Effiong J. U., Olalusi O. B., Arunachalam K. P., de Azevedo A. R. G., Martinelli F. R. B., Monteiro S. N. Experimental Findings and Validation on Torsional Behavior of Fibre-Reinforced Concrete Beams: A Review. *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 6. Article 1171. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14061171> (дата звернення: 04.05.2025).
- [2]. Andriichuk O., Babich V., Yasyuk I., Uzhehov S. The influence of repeated loading on work of the steel fiber concrete drainage trays and pipes on the roads. *MATEC Web of*

- Conferences. 2017. № 116. С. 02001, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602001> (дата звернення: 04.05.2025).
- [3]. Vijayan D. S., Sivasuriyan A., Parthiban D., Jakimiuk A., Bayat H., Podlasek A., Vaverková M. D., Koda E. A comprehensive analysis of the use of SFRC in structures and its current state of development in the construction industry. *Materials*. 2022. Vol. 15, № 19. Article 7012. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15197012> (дата звернення: 04.05.2025).
- [4]. Xue W., Chen J., Xie F., Feng B. Orientation of Steel Fibers in Magnetically Driven Concrete and Mortar. *Materials*. 2018. Vol. 11, № 1. Article 170. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/1/170> (дата звернення: 04.05.2025).
- [5]. Дорошенко О. Ю. Базальтове волокно як компонент цементобетону. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2021. Вип. 198. С. 22–29. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256504> (дата звернення: 05.05.2025).
- [6]. Дорошенко О. Ю. Вивчення властивостей дрібнозернистих цементобетонів із використанням пластифікаторів і базальтового волокна. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2023. Вип. 206. С. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296773> (дата звернення: 05.05.2025).
- [7]. Ahmad J., González-Lezcano R. A., Majdi A., Ben Kahla N., Deifalla A. F., El-Shorbagy M. A. Glass Fibers Reinforced Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis. *Materials*. 2022. Vol. 15. Article 5111. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15155111> (дата звернення: 05.05.2025).
- [8]. Blazy J., Blazy R., Drobiec Ł. Glass Fiber Reinforced Concrete as a Durable and Enhanced Material for Structural and Architectural Elements in Smart City—A Review. *Materials*. 2022. Vol. 15, № 8. Article 2754. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15082754> (дата звернення: 06.05.2025).
- [9]. Марущак У. Д., Саницький М. А., Королько С. В. Наномодифіковані швидкотверднучі бетони, армовані дисперсними волокнами. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва. 2017. № 877. С. 137–143. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/44189> (дата звернення: 06.05.2025).

THE IMPACT OF DISPERSED FIBER REINFORCEMENT ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF CONCRETE

This study investigates the impact of dispersed fiber reinforcement on the physico-mechanical properties and microstructure of concrete. The effectiveness of various fiber types including steel, polymer, glass, basalt and carbon is evaluated in terms of improving flexural and tensile strength, crack resistance, impact toughness and overall structural durability. The analysis highlights the role of fiber type, modulus of elasticity and bonding quality in optimizing internal stress redistribution and minimizing crack formation. The findings confirm that dispersed reinforcement enhances the performance and longevity of concrete elements, particularly under dynamic and aggressive environmental conditions.

УДК 624.137.5

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРОТИЗСУВНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ГЛИБОКОГО ЗАКЛАДАННЯ

**Осадчий В.С., к.т.н., доц., Анісімов К.І., доц.,
Великий Д.І., к.т.н., доц., Бааджи В.Г., асистент**
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

В інженерній практиці для захисту територій, будівель та споруд, що розташовані на зсувних і зсувонебезпечних схилах застосовуються наступні основні протизсувні споруди інженерного захисту: пальові конструкції глибокого закладання, пальово-анкерні конструкції, підпірні та армогрунтові стіни, контрфорси, контрбанкети, берегозахисні споруди. Протизсувні споруди інженерного захисту призначені для закріплення зсувів ковзання та видавлювання на схилах, де нижче поверхні ковзання залягають міцні корінні породи. Протизсувні споруди повинні сприймати значні величини зсувного тиску і забезпечувати загальну та місцеву стійкість схилу. Вибір типу протизсувних споруд, їх розташування на схилі та конструктивні розміри залежать від величини зсувного тиску та виконуються за результатами розрахунків стійкості схилу на основі техніко-економічного порівняння варіантів. В якості споруд інженерного захисту необхідно приймати найбільш ефективні конструкції. Як правило, такими виявляються пальові конструкції глибокого закладання.

В представлений роботі виконане числове моделювання роботи протизсувної конструкції із буросічних паль при взаємодії із ґрунтовим масивом. Протизсувна споруда складається з паралельних довжині зсувного схилу контрфорсів, які утворені з буросічних паль різного діаметру та об'єднані зверху залізобетонним ростверком. Діаметр паль збільшується в напрямку переміщення зсуву. Контрфорси прорізають поверхню ковзання і закладені нижнім кінцем в стійкі ґрунти [1].

Реалізація числового експерименту виконана в ліцензійному геотехнічному програмному комплексі Midas GTS NX, в якому реалізований метод скінчених елементів (МСЕ). Поведінка ґрунту в розрахунковій схемі описувалась пружно-пластичною моделлю Мора-Кулона. Геометричний профіль та фізико-механічні властивості ґрунтів, що складають розрахунковий схил були прийняті відповідно до реальних ґрунтових і топографічних умов схилів Одеського узбережжя. Розрахунковий схил складається з трьох шарів ґрунту. Зсувна товща відділена від корінних порід шаром ґрунту порушеної структури (лігніти) потужністю 0,3 м. Форма поверхні ковзання прийнята близькою до кривої обрушення, що характерна для зсувів видавлювання. Фізико-механічні характеристики ґрунтів схилу наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтів

№ з/п.	Найменування ґрунту	Питома вага ґрунту ρ , кН/м ³	Кут внутрішнього тертя φ , град.	Питоме зчеплення c , кПа	Модуль деформації E , МПа
1	Зсувна товща	18	22	20	15
2	Ґрунт порушеної структури	16	7	5	13
3	Корінні породи	19	24	25	22

Розрахунковий схил віднесений до зсувонебезпечного. Клас наслідків (відповідальності) споруди прийнятий СС2. Нормативний коефіцієнт запасу стійкості при основному сполученні навантажень складає 1,20. Навантаження і впливи, які прийняті для розрахунків стійкості схилу, відповідають вимогам нормативних документів ДСТУ-Н В.1.1-37:2016 [2] та ДБН В.1.1-46:2017 [3]. Попереднє значення критичної відстані між утримуючими елементами (контрфорсами), з умови непродавлювання між ними, було визначене за теорією арочного ефекту [4].

Загальний вид розрахункової моделі представлений на рис. 1. В розрахунковій моделі утримуючі елементи не були об'єднані ростверком.

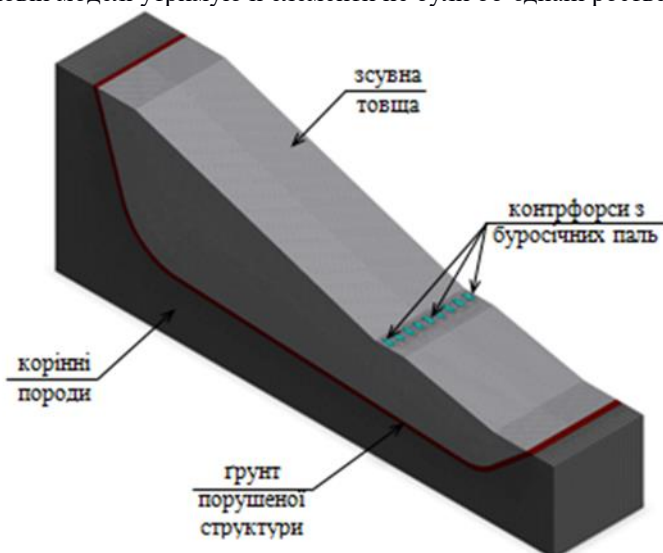


Рис. 1. Загальний вид розрахункової моделі

Розрахунки напружено-деформованого стану елементів конструкції сумісно із ґрунтовим масивом виконувались МСЕ, з визначенням коефіцієнту запасу стійкості методом редукції (зниження міцнісних характеристик). Застосування даного методу числового аналізу дає можливість змоделювати форму обвалення, яка близька до реальної, і отримати мінімальний коефіцієнт запасу стійкості схилу (укосу).

Ґрунтовий масив і утримуючі елементи в розрахунковій моделі представлені об'ємними скінченими елементами. Коефіцієнт тертя ґрунту по палі прийнятий, як для зв'язного ґрунту, рівним 0,6. Контакт ґрунту з пальовими елементами здійснений через площинний інтерфейс.

В розрахунковій моделі утримуюча конструкція складається з ряду контрфорсів у кількості 9 штук (рис. 2). Контрфорси складаються із буросічних паль діаметрами 800, 1000 і 1200 мм. Діаметр паль збільшується в напрямку переміщення зсуву. Довжина контрфорсів, з врахуванням глибини закладання у корінні породи, складає 19 м, а довжина контрфорсів уздовж схилу прийнята 2,5 м. Відстань між контрфорсами становить 2,5 м.

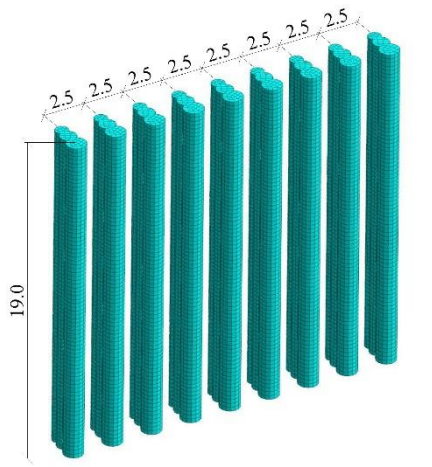


Рис. 2. Загальний вид утримуючої конструкції із контрфорсів глибокого закладання

В результаті розрахунків напружено-деформованого стану контрфорсів, були отримані зони максимальних дотичних напружень і значення коефіцієнту запасу стійкості. Загальна стійкість схилу, з урахуванням протизсувної конструкції із контрфорсів глибокого закладання, забезпечена з мінімальним коефіцієнтом запасу стійкості $k_{st} = 1,211$, при нормативному значенні для споруд класу наслідків (відповідальності) CC2 - $k_{sn} = 1,20$.

Також були отримані значення внутрішніх зусиль (згинальних моментів і перерізуючих сил), що виникають в центральному найбільш навантаженому контрфорсі, при основному сполученні навантажень (рис. 3, 4).

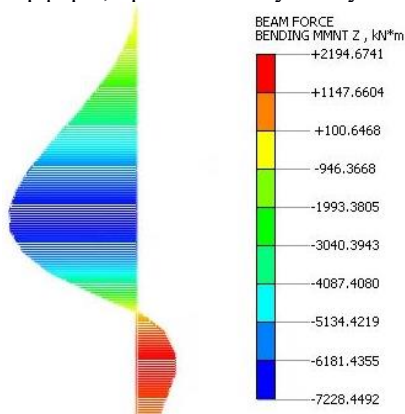


Рис. 3. Епюра згинальних моментів у контрфорсах, кН·м

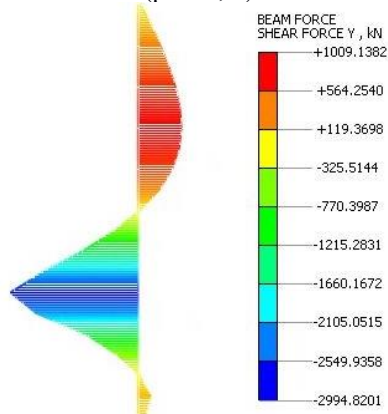


Рис. 4. Епюра перерізуючих сил у контрфорсах, кН

На основі аналізу результатів можна зробити наступні висновки:

1. Протизсувна споруда з ряду контрфорсів глибокого закладання може застосовуватись для стабілізації зсувонебезпечних та зсувних схилів.
2. Контрфорс з буросічних паль може сприймати значно більші значення зсувного тиску завдяки більшій згинальній жорсткості і міцності.
3. Методика розрахунку протизсувної споруди із контрфорсів глибокого закладання може бути розроблена на основі результатів числового моделювання взаємодії утримуючих елементів конструкції з ґрунтовим масивом при різних відстанях між елементами та діаметрах буросічних паль, що утворюють контрфорси.

- [1]. Протизсувна споруда : пат. 152347 Україна : МПК E02D 29/02. № u 202202949 ; заявл. 15.08.2022 ; опубл. 11.01.2023, Бюл. № 2.
- [2]. ДСТУ-Н В.1.1-37:2016. Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. К.: ДП «УкрНДНЦ, 2017. 94 с.
- [3]. ДБН В 1.1-46:2017. Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. К.: Мінрегіонбуд України, 2017. 43 с.
- [4]. Ginzburg L.K. Landslide retaining structures. Stroyizdat, 2022. - 80 с.

NUMERICAL MODELING OF THE OPERATION OF ANTI-SLIDE STRUCTURE OF DEEP BUILDING

The work performed numerical modeling of the interaction of the elements of the anti-slide structure with the soil massif. Numerical modeling was performed in the Midas GTS NX software package, which implements the finite element method. The behavior of the soil in the calculation model was described by the elastic-plastic Mohr-Coulomb model. As a result of the calculations, the stability factor and internal forces arising in the structural elements were determined.

УДК 539.3

ПРО УМОВИ ВИНИКНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ НЕСТІЙКОСТІ ГІДРОПРУЖНОЇ СИСТЕМИ: «ПІВПРОСТІР В'ЯЗКОЇ РІДИНИ – ПРУЖНИЙ ШАР, ПІДДАНИЙ СКІНЧЕННИМ ДЕФОРМАЦІЯМ»

Багно О.М., д.ф.-м.н., провд.н.с.

Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України, м. Київ

У даній роботі для дослідження стійкості пружно-рідинного хвилеводу, що складається з пружного шару та півпростору в'язкої рідини, застосовуються біль загальні моделі, які враховують початкове напруження в твердому тілі та стисливість і в'язкість рідини. При цьому використовуються тривимірні лінеаризовані рівняння Нав'є-Стокса для рідини та тривимірні лінеаризовані рівняння теорії пружності скінченних деформацій для твердого тіла. Передбачається, що рідина є в'язкою і в незбуреному стані перебуває в спокої. Використовуються постановки задач і метод, оснований на застосуванні представлень загальних розв'язків лінеаризованих рівнянь руху в'язкої стисливої рідини та попередньо напруженого нестисливого пружного тіла, які запропоновані в роботах [1, 2].

Далі аналітично-чисельним методом розв'язано задачу про поширення гармонічних хвиль у гідропружній системі, яка складається з півпростору в'язкої стисливої рідини та пружного шару, підданого великим (скінченним) початковим деформаціям. Побудовані дисперсійні криві та графіки залежностей величин фазових швидкостей мод від початкового стиснення для суто пружного шару, а також для гідропружної системи.

Аналіз отриманих числових результатів показав, що для суто пружного шару при стисненні $\lambda_1 \approx 0,54$ (більш точне значення $\lambda_1 \approx 0,543694$), тобто при зменшенні довжини високоеластичного нестисливого тіла на 46 відсотків величина фазової швидкості першої моди Лемба обертається в нуль. Це свідчить про те, що в умовах плоского напружено-деформованого початкового стану для високоеластичного нестисливого неогуківського тіла при стисненні $\lambda_1 \approx 0,54$ виникає явище поверхневої нестійкості. Зазначимо, що це значення збігається з величиною, раніше отриманою в теорії стійкості [3] і відповідає значенню параметра критичного укорочення $\lambda_{кр}$ [3].

Для гідропружного хвилевода встановлено, що фазова швидкість першої квазілембовської моди приймає нульове значення при $\tilde{\lambda}_1 \approx 0,5436955$. Це свідчить про те, що в умовах плоского напружено-деформованого початкового стану поверхня пружного шару гідропружної системи, яка контактує з півпростором в'язкої рідини, при стисканні $\tilde{\lambda}_{кр} \approx 0,5436955$ втрачає поверхневу стійкість. У другій поверхні пружного шару, яка є вільною, явище поверхневої нестійкості виникає при $\lambda_{кр} \approx 0,543694$. Ці відмінності між значеннями $\tilde{\lambda}_{кр}$ та $\lambda_{кр}$ свідчать про те, що наявність півпростору в'язкої стисливої рідини призводить до зниження порогу поверхневої нестійкості

хвильоводу і виникнення її раніше при меншому стисненні ($\tilde{\lambda}_{кр} \approx 0,5436955 > \lambda_{кр} \approx 0,543694$).

Раніше було встановлено, що гідропружна система, яка складається з пружного шару та півпростору ідеальної рідини, втрачає поверхневу стійкість при $\tilde{\lambda}_{кр} \approx 0,543695$. Як бачимо це значення більше величини параметра критичного укорочення для суто пружного шару $\lambda_{кр} \approx 0,543694$, але менше відповідного параметра критичного укорочення для гідропружної системи з півпростором в'язкої рідини $\tilde{\lambda}_{кр} \approx 0,5436955$.

Таким чином, показано, що визначені величини параметрів критичного укорочення $\tilde{\lambda}_{кр} \approx 0,543695$ і $\tilde{\lambda}_{кр} \approx 0,5436955$ є умовами виникнення поверхневої нестійкості гідропружних хвильоводів, які складаються з пружного шару, підданого великим (скінченним) деформаціям, та півпростором нев'язкої або в'язкої рідини. При втраті стійкості пружно-рідинними хвильоводами в них припиняється процес генерування і поширення хвиль, а також перенесення хвильової енергії.

1. Гузь А. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями: в двух частях. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.

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

3. Гузь А.Н. Устойчивость упругих тел при конечных деформациях. – Киев: Наук. думка, 1973. – 272 с.

ON THE CONDITIONS FOR THE OCCURRENCE OF SURFACE INSTABILITY OF A HYDROELASTIC SYSTEM: «A HALF-SPACE OF A VISCIOUS FLUID - ELASTIC LAYER SUBJECT TO FINITE DEFORMATIONS»

The problem of generalized Lamb waves propagation in a pre-deformed incompressible elastic a layer that interacts with a half-space of an viscous compressible fluid is considered. The study is conducted on the basis of the three-dimensional linearized equations of elasticity theory finite deformations for the incompressible elastic layer and on the basis of the three-dimensional linearized Navier-Stokes equations for half-space viscous compressible fluid. The influence of finite initial deformations in an incompressible elastic layer and of the half-space of viscous compressible fluid on the phase velocities and surface instability of the hydroelastic waveguide are analyzed.

УДК 624.014.2:004.942

ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ У ПК REVIT

Балдук Г.П., к.т.н., Балдук П.Г., к.т.н., доцент

Одеський державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Металеві конструкції відігравали й продовжують відігравати важливу роль у будівельній галузі. Найчастіше вони асоціюються з об'єктами промислового чи громадського будівництва та швидким процесом будівельно-монтажних робіт. Тому розробка проектної документації на металоконструкції завжди залишається актуальною.

Сучасні жорсткі умови конкуренції серед проектних організацій диктують необхідність не лише якісної, а й швидкої розробки проектних рішень.

Зазвичай час впливає на якість проектування: чим більше у вас часу, тим імовірніше ви зможете розробити якіснішу проектну документацію. Але водночас час впливає і на вартість: чим довше ви розробляєте документацію, тим дорожчою вона стає або тим менше ви заробляєте.

Саме тому кожне підприємство шукає можливості оптимізувати процес розробки проектної документації так, щоб не втрачати якість, водночас зменшуючи собівартість робіт та/або витрати часу на її розробку.

Наразі існує багато програмних комплексів, які пришвидшують розробку проектної документації. Їх можна поділити на розрахункові (наприклад, LIRA-FEM) та комплекси для моделювання (наприклад, Revit). Використовуючи можливості цих програм, умовно можна виділити три шляхи оптимізації процесу розробки проектної документації:

1. використання максимально можливої кількості ідентичних проектних рішень;
2. оптимізація процесу моделювання та оформлення проектних рішень розроблених металоконструкцій;
3. поєднання першого та другого шляхів.

На жаль, унікальність форм конструкцій, технологічних ліній та інших факторів зазвичай не дозволяє максимально використовувати ідентичні проектні рішення. Але застосування певних підходів до моделювання може забезпечити оптимізацію процесу моделювання та оформлення проектних рішень розроблених металоконструкцій.

Наприклад, у ПК Revit є базові інструменти для моделювання металоконструкцій: балки, розкоси, балкові системи та ферми. Зазвичай процес моделювання металоконструкцій промислової будівлі виглядає так:

розробник проєктної документації, отримавши результати розрахунків, починає моделювати колони, ферми, вертикальні, похилі й горизонтальні металеві зв'язки, прогони покриття тощо. З колонами, фермами й прогонами зазвичай не виникає проблем, оскільки ми маємо базові інструменти та можемо завантажити відповідне сімейство. А ось зі зв'язками часто виникають складнощі. Дуже рідко зв'язок представлений простою балкою. Зазвичай форма зв'язку Х-подібна, портална чи у вигляді римської цифри V. Отже, доводиться моделювати кожен окремий елемент цього зв'язку, на відміну від ферм, у яких необхідно лише налаштувати її елементи, які з'являються автоматично при створенні згідно з аналітичною схемою. Складності додає, якщо такі складні зв'язки є похилими. На це витрачається багато часу як на моделювання, так і на оформлення креслень.

Для оптимізації процесу моделювання зв'язків складної форми у ПК Revit можна використовувати відповідно розроблені сімейства ферм. Тобто, замість того щоб моделювати кожен окремий елемент зв'язку, ми розробляємо сімейство ферми, в якому промальовуємо схему майбутнього зв'язку. Після завантаження у проєкт, налаштовується це сімейство, шляхом завдання необхідних довжин, висот й, за потреби, кутів нахилу, й автоматично отримується елементи зв'язків, які сформувалися за вказаною геометрією схеми. Залишається лише їх виконати й налаштування.

Ще один підхід до оптимізації процесу моделювання та оформлення металоконструкцій передбачає використання або автоматичного формування вузлів, або використання сімейств «балок» (з яких *потім складаються усі конструкції*), на кінцях яких уже змодельовані металеві пластини й метизи, одразу з елементами оформлення. Використання таких балок значно пришвидшує процес налаштування вузлів та їх оформлення.

Застосування описаних підходів при моделюванні металоконструкцій у ПК Revit призводить до значної оптимізації процесу моделювання без втрати якості та з істотною економією часу, навіть не зважаючи на витрати часу, необхідного для розробки відповідних сімейств.

[1]. Liraland. Програма для проєктування і розрахунку будівельних конструкцій. Liraland. Функціональні можливості. 11.05.2025. URL: <https://www.liraland.ua /lira/> (дата звернення: 11.05.2025).

[2]. Autodesk. Products. Revit. overview. 11.05.2025. URL: <https://www.autodesk.com/products/revit/overview> (дата звернення: 11.05.2025).

APPROACHES TO OPTIMIZING THE MODELING OF METAL STRUCTURES IN REVIT

The work considers methods for optimizing the development of design documentation and approaches that ensure effective modeling of metal structures in the Revit software package (for example, the development of truss families or automatic formation of nodes).

УДК 614.841.45

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Балло Я.В., д.т.н., ст. дослід, Балло В.П.

Інституту наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗУ, м. Київ
Київський національний університет будівництва і архітектури

Забезпечення протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури (далі - ОКИ) в умовах сьогодення є надзвичайно важливим завданням, яке спрямоване на прогнозування потенційних ризиків і загроз та, як наслідок, розроблення ефективних заходів для організації захисту життєвої системи суспільства. Важливість забезпечення протипожежного захисту критичної інфраструктури є досить очевидною, оскільки від неї залежить наявність електрики, води, тепло- та газопостачання, надання послуг комунальними підприємствами та функціонування промислового сектору. Формування вимог до захисту ОКИ в Україні, навіть після початку війни в 2014 році було доволі умовним та не враховувало більшості загроз, які суспільство почало реально відчувати після початку повномасштабного вторгнення російської федерації в 2022 році.

В 2025 році вперше розроблено та впроваджено в практичну сферу «Порядок (методику) визначення оцінку стану захищеності об'єктів критичної інфраструктури» (далі - Методика). Ця методика визначає алгоритм проведення оцінювання стану захищеності ОКИ в частині забезпечення пожежної, техногенної безпеки та цивільного захисту на об'єкті, а також оцінювання рівня реалізації на об'єкті додаткових вимог інженерного захисту ОКИ для зменшення потенційних небезпечних наслідків в результаті зовнішніх небезпечних впливів воєнного характеру. Дана методика застосовується для об'єктів всіх категорій критичної інфраструктури, які установлені відповідно до Закону України «Про критичну інфраструктуру» [1] та постанови Кабінету Міністрів України від 9 жовтня 2020 р. №1109 відповідно до «Порядку ведення Реєстру об'єктів критичної інфраструктури, включення таких об'єктів до Реєстру, доступу та надання інформації з нього», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 28 квітня 2023 р. № 415» [2].

На першому етапі оцінювання передбачається збір інформації щодо об'єкту, відносно якого здійснюється аналіз стану захищеності ОКИ, при цьому оцінювання стану захищеності об'єкта критичної інфраструктури передбачається для кожної будівлі (споруди) об'єкта критичної

інфраструктури та їх прилеглої території, що забезпечують діяльність суб'єкту

Другий етап алгоритму передбачає проведення процедури оцінювання фактичного стану захищеності об'єкту критичної інфраструктури за показниками пожежна, техногенна безпека та цивільний захист ОКІ згідно визначеного переліку критеріїв та з врахуванням вимог [3]. Даний перелік вимог (критеріїв), що впливають на оцінку стану захищеності об'єктів за показниками пожежна та техногенна безпека і цивільний захист включає в себе вимоги до:

- утримання території об'єкту;
- утримання будинків, приміщень та споруд;
- утримання евакуаційних шляхів і виходів;
- стан утримання електроустановок;
- системи протипожежного захисту та засоби зв'язку;
- джерела зовнішнього протипожежного водопостачання;
- система внутрішнього протипожежного водопроводу;
- пожежна техніка та первинні засоби пожежогасіння;
- організаційні заходи щодо забезпечення пожежної безпеки.

Представником, що здійснює оцінювання (Органу державного нагляду (контролю) у сфері пожежної та техногенної безпеки) показники стану захищеності ОКІ оцінюються за бальною системою, виходячи із ознаки дотримання встановленого показника: «так», «частково», «ні», при цьому:

- якщо показник має ознаку «так», йому присвоюється 2 бали;
- якщо показник має ознаку «частково», йому присвоюється 1 бал;
- якщо показник має ознаку «ні», йому бали не присвоюються (0 балів).

Значення балів, що присвоєні відповідним показникам оцінки стану захищеності об'єкта критичної інфраструктури, підсумовуються за кожним критерієм оцінки стану захищеності об'єкта критичної інфраструктури та в цілому по об'єкту, і виставляються у спеціальній формі про результати оцінювання. Ознака стану захищеності об'єкта критичної інфраструктури за відповідним критерієм визначається відповідно до співвідношення набраної кількості балів до її максимально можливої суми. Відповідна ознака за критерієм визначається на основі узагальненої нормованої оцінки стану захищеності за цим критерієм відповідно до такого правила: якщо $0,85 < \text{оцінки} \leq 1$ виставляється ознака «забезпечує»; якщо $0,65 < \text{оцінки} \leq 0,85$ виставляється ознака «обмежено забезпечує»; якщо $\text{оцінки} \leq 0,65$ виставляється ознака «не забезпечує». На підставі даної процедури оцінювання відбувається заключне заповнення Акту оцінки стану захищеності об'єкта критичної інфраструктури.

Розробка даної методики дозволила впровадити нові протипожежні заходи для захисту ОКІ, зокрема захисні конструкції із габонів та типу «Шелтер», додаткові незалежні джерела електроживлення систем протипожежного захисту, вогнезахисне оброблення конструкцій та елементів інженерних систем. Разом із цим, розроблена методика дозволяє лише оцінити фактичний стан захищеності об'єкту критичної інфраструктури та усунути виявлені недоліки і запобігти базовим загрозам. Проте, попередній аналіз новітніх загроз військового характеру передбачає врахувати наступні показники, які можуть впливати на якісний підхід забезпечення протипожежного захисту таких об'єктів, а саме:

- оцінку можливості ідентифікації ворогом критично важливих та пожежонебезпечних об'єктів що забезпечують функціонування ОКІ;
- аналіз потенційних загроз порушення протипожежного режиму пов'язаних з диверсійними заходами;
- залежність об'єкту від зовнішньої інфраструктури;
- аналіз достатності первинних засобів пожежогасіння та їх комплектування з врахуванням реальних, а не номінальних потреб;
- організація заходів, для мінімізації потенційних небезпечних наслідків в разі НС;
- вплив зовнішніх надзвичайних ситуацій, техногенних катастроф та аварій на збереження можливості функціонування об'єкту;
- організація та планування заходів з формування резервного фонду для забезпечення сталого функціонування об'єкту;
- евакуація людей в зони безпеки, в тому числі за межі об'єкту.

Виходячи з вище викладеного, для забезпечення якісних підходів щодо забезпечення протипожежного захисту ОКІ та можливості прогнозування потенційних ризиків постає завдання щодо перегляду орієнтовних базових вимог пожежної безпеки для таких об'єктів та розроблення індивідуальних концепцій захисту для таких об'єктів, які будуть засновані на параметричних підходах нормування.

[1]. Закон України «Про критичну інфраструктуру» № 1882-IX від 16.11.2021.

[2]. Постанова Кабінету Міністрів України від 22 липня 2022 р. № 821 «Про затвердження Порядку проведення моніторингу рівня безпеки об'єктів критичної інфраструктури».

[3]. Типові рішення з інженерного захисту критичних елементів об'єктів критичної інфраструктури від ураження засобами повітряного нападу противника в рамках реалізації концепції «Країна фортеця», схвалені постановою Кабінету Міністрів України від 26 квітня 2024 р. № 471.

PROBLEM ISSUES OF FIRE PROTECTION OF CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES

The article discusses the issues of ensuring fire protection of critical infrastructure facilities and the possibility of predicting potential risks. A preliminary analysis of the latest threats of a military nature is presented, which involves taking into account indicators that may affect the qualitative approach to ensuring fire protection of such facilities. The proposed improvements will allow to increase the level of protection of critical facilities at the design stage.

УДК 624.012

MODELING THE CHANGING STRESS-STRAIN STATE OF CONSTRUCTIONS DURING THE LIFE CYCLE IN LIRA- FEM SOFTWARE

M.S. Barabash, Doctor of Technical Sciences, Professor; CEO

State University "KAI", Kyiv; "LIRA SAPR" Ltd, Kyiv; bmari.lira@gmail.com

This report presents developed numerical methods that allow for modeling the entire life cycle process of buildings and constructions, including stages of assemblage, rheological processes during operation, and the process of structural system adaptability to changing loads in case of force majeure situations.

One of the main directions in the design of building and construction is increasing reliability, safety, and durability with reducing material consumption. Importantly, numerical modeling of life cycle processes is crucial, particularly those related to changes in the stress-strain state (SSS) at all stages of the construction object's life [1].

The necessity for comprehensive numerical analysis of buildings and constructions arises from: the increasing complexity of structural solutions and operating conditions (multidimensionality, complexity, and multifunctionality of buildings and constructions, their large dimensions, exceptional difficulty in monitoring the current technical state, the impossibility of repairs without completely removing loads, the tendency for changes in spatial planning and load modes during operation); uniqueness (soil, climatic, and other external conditions, the unique complexity and duration of construction and operation, the increased role of the "human factor" at all stages of the life cycle); as well as the incompleteness and uncertainty of initial data (geometry, stiffness, boundary and initial conditions, loads, and impacts).

However, all these factors are not fully accounted for in existing regulatory documents and in design and construction practices, which leads either to insufficient reliability of structures or excessive material consumption.

The aim of this research is to solve the issue of structural safety for buildings and constructions through the development of a set of scientifically based methods for numerically modeling the SSS of structures, considering all stages of their life cycle, and advancing calculation methods that account for nonlinear deformation. Numerical modeling of life cycle processes allows for the formulation and solution of problems that cannot be addressed through physical experimentation [2].

Integrating the consideration of the SSS changes throughout the life cycle into design practices enables a reliable assessment of the stress-strain state during the design phase, as well as the conduct of multiple numerical experiments.

[1] Barabash M., Kovalev A., Romashkina M. Computational assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete building structures using the LIRA-SAPR software. Building structures. Theory and Practice, (12), 53-64.

[2] Barabash M. O., Kostyra N., Bashinskyi Y., Pisarevskyi B. (2020). Stress-strain state of structures taking into account the technical condition category of the building and changes in seismic load intensity. Problems of Urban Environment Development: Collection of Scientific Works, 1 (24), 11–22.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ В ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ LIRA-FEM

У цій доповіді представлено розроблені чисельні методи, що дозволяють моделювати весь життєвий цикл будівель і споруд, включаючи етапи монтажу, реологічні процеси під час експлуатації та адаптацію конструктивної системи до змінних навантажень у випадку форс-мажорних ситуацій. Основним завданням є підвищення надійності, безпеки та довговічності конструкцій при одночасному зниженні матеріаломісткості. Необхідність комплексного чисельного аналізу обумовлена зростаючою складністю проєктних рішень, унікальністю умов експлуатації та неповнотою вихідних даних. Запропоновані методи дозволяють враховувати зміни напружено-деформованого стану на всіх етапах життєвого циклу, що сприяє більш точній оцінці конструкцій на стадії проєктування та проведенню чисельних експериментів.

УДК.624.193.4

ВПЛИВ ПОВЗУЧОСТІ ТА СТАРІННЯ НА СТІЙКІСТЬ СТРИЖНІВ

Бекірова М. М., к.т.н., доцент

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м.Одеса
bekirova@odaba.edu.ua

Вирішення задачі про стійкість однорідних і неоднорідних (зокрема, залізобетонних) стрижнів виконано у припущенні лінійної повзучості та відсутності тріщин.

Зазвичай при вивченні впливу повзучості на стійкість стиснутих стрижнів розглядаються стрижні, шарнірно оперті по кінцях. Міра повзучості матеріалу описується найпростішими функціями, що дозволяють вирішувати відповідні інтегральні рівняння в аналітичному вигляді. [1]

Розв'язана задача для однорідних та неоднорідних стрижнів при описі кривих повзучості функціями досить загального виду. Прийнято, що граничні умови постійні в усьому розглянутому проміжку часу.

Прийнята залежність

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{t_0}^t \sigma(t) \frac{\partial \delta(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad \delta(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \quad (1)$$

Розглядається гнучкий залізобетонний стрижень з постійним поперечним перерізом, який має дві осі симетрії. Армування симетричне. Стрижень стиснутий постійною у часі силою. Вважається, що недосконалість у вигляді погібї або ексцентриситету призводить до вигину стрижня у напрямку однієї осі. Вигин у напрямку іншої осі виключається. Після відповідного аналізу прийшли до висновку, що для стрижнів як з початковою погібю, так і з позациентрово прикладеним навантаженням, одержано абсолютно однакове рівняння.

Використовуючи співвідношення

$$\frac{1}{\rho(x, t)} = \frac{\varepsilon_1(x, t) - \varepsilon_2(x, t)}{h} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho(x, t)} = \begin{cases} -\frac{\partial^2 [y(x, t) - y_0(x)]}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (3)$$

а також рівняння рівноваги та залежність (1), отримаємо інтегро-диференціальне рівняння вигнутої осі стрижня.

$$(1+r) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} + \frac{F}{EY_b} y(x,t) - \int_{t_0}^t \left[rE \frac{\partial^2 y(x,\tau)}{\partial x^2} + \frac{F}{Y_c} y(x,\tau) \right] \frac{\partial \delta(t,\tau)}{\partial \tau} d\tau =$$

$$= \begin{cases} [1 + \delta(t, t_0)] \frac{\partial^2 y_0(x)}{\partial x^2} \\ -\frac{F}{Y_c} s\delta(t, t_0) \end{cases} \quad (4)$$

У наведеному вигляді інтегро-диференціальне рівняння (4) може використовуватися при розгляданні стрижнів, шарнірно опертих по кінцях. Після подвійного диференціювання по x це рівняння стає придатним для вирішення задач з будь-якою умовою спирання.

$$(1+r) \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \frac{F}{EI_c} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} - \int_{t_0}^t \left[rE \frac{\partial^4 y(x,\tau)}{\partial x^4} + \frac{F}{I_b} \frac{\partial^2 y(x,\tau)}{\partial x^2} \right] \frac{\partial \delta(t,\tau)}{\partial \tau} =$$

$$= \begin{cases} [1 + rE\delta(t, t_0)] \frac{\partial^4 y_0(x)}{\partial x^4} \\ 0 \end{cases} \quad (5)$$

При $t = t_0$ інтегро-диференціальне рівняння (5) перетворюється на відоме диференціальне рівняння пружно миттєвої задачі. [2] Після деяких математичних перетворень інтегро-диференціальне рівняння (5) зводиться до диференціального рівняння сьомого порядку з частинними похідними.

$$B_1(t) \frac{\partial^7 y(x,t)}{\partial t^3 \partial x^4} + B_2(t) \frac{\partial^6 y(x,t)}{\partial t^2 \partial x^4} + B_3(t) \frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial t \partial x^4} +$$

$$+ B_4(t) \frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial t^3 \partial x^2} + B_5(t) \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial t^2 \partial x^2} + B_6(t) \frac{\partial^3 y(x,t)}{\partial t \partial x^2} = 0. \quad (6)$$

Диференційне рівняння (6) є рівнянням руху стрижня. Досліджуючи рівняння руху стрижня можна встановити тенденції у розвитку переміщень в залежності від величини стискаючої сили.

Якщо переміщення при $t \rightarrow \infty$ прагнуть до кінцевої величини, то стан стрижня слід вважати стійким і, навпаки, якщо переміщення необмежено зростають, то стан стрижня нестійкий.

Висновки. Критична сила при тривалій дії навантаження залежить лише від нестаріючої частини деформації повзучості. Це пов'язано з умовністю прийнятого формулювання поняття критичної сили, відповідно до якої

величина цієї сили визначається за характером руху стрижня при $t \rightarrow \infty$, тобто тоді, коли закінчився процес старіння матеріалу.

- [1]. Прокопович І.Є. Основи прикладної лінійної теорії повзучості. К.: Вища школа. 1978.114с.
[2]. Вольмір А.С. Стійкість пружних систем. М.:Фізматдержвид. 1963. 880с.

INFLUENCE OF CREEP AND AGING ON STRENGTH OF RODS

The problem for homogeneous and non-homogeneous rods is solved when describing creep curves by functions of a fairly general form. Linear creep and the absence of cracks are assumed. An equation of motion of the rod is obtained, by studying which it is possible to establish tendencies in the development of displacements depending on the magnitude of the compressive force. The concept of critical force is introduced.

УДК539.3:624.046.3

ON THE CONTROL OF CRITICAL FORCE OF AN ELASTICALLY SUPPORTED ROD

Bekshaev S.

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
s.bekshayev@gmail.com

The behavior of the main critical force P of a rectilinear compressed rod supported by two supports is investigated when the positions of the supports changes. The stiffness coefficients c_1 and c_2 of the supports, as well as the law of change along the length of the bending rigidity of the rod, are assumed to be arbitrary.

1. Rod with internal location of supports (RILS) (Fig. 1a).

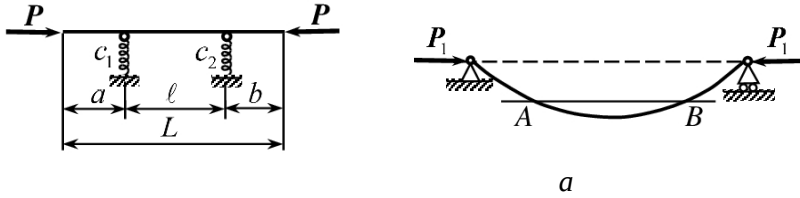


Fig 1. *a* – Rod with internal location of supports (RILS)
b – Typical main buckling form of rod with rigid hinged supports at the ends

The following notations are accepted:

P_1 is the main critical force of a rod supported at its ends by absolutely rigid hinge supports (Fig. 1b);

$P_R = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} \frac{\ell^2}{L}$ is the critical force of an absolutely rigid rod supported by elastic supports; L and ℓ are respectively the length of the rod and the distance between the supports (Fig. 1a);

$P_{RL} = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} L$ is the value of P_R at $\ell = L$, $P_R \leq P_{RL}$.

It has been established that the critical force P of the rod under study cannot exceed P_1 and P_R , $P \leq P_1$, $P \leq P_R \leq P_{RL}$.

At $P < P_1$ the buckling form has a slope of one sign (Fig. 2a).

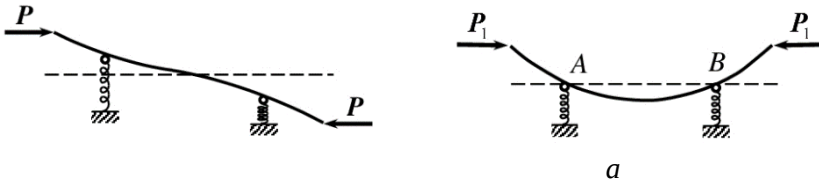


Fig 2. *a* – Typical buckling form of a RILS at $P < P_1$
b – Typical buckling form of a RILS at $P = P_{\max} = P_1$

With a relatively low rigidity of the supports $P_{RL} < P_1 \Rightarrow P < P_1$, and the rod buckles in the typical shape (Fig. 2a). In this case, to increase the critical force P , the right support should be moved to the right, and the left one to the left. With the absence of restrictions, the maximum critical force will be $P_{\max} = P_{RL}$ when the supports reach the ends of the rod. When the supports are simultaneously moved to the right ($\ell = \text{const.}$), P increases if the slope of the form on the right support is greater than on the left one. When $P_{RL} > P_1$ there exists a set of positions of supports for which $P < P_1$. Such, in particular, will be all the positions in which $\ell \leq L\sqrt{P_1/P_{RL}}$. By increasing the distance between the supports, it is possible to get positions in which P reaches the maximum $P_{\max} = P_1$. There are an infinite number of such positions and they are located at the points of intersection of the buckling form of the rod, shown in Fig. 1b, corresponding to its main critical force P_1 , and the straight line parallel to the axis of the undeformed rod (points A and B in Fig. 1b). The buckling forms corresponding to these positions (Fig. 2b) are translations of the form shown in Fig. 1b. In this case, the reactions of the supports are equal to zero. These forms, along with the critical force corresponding to them, will be present in the spectrum of the rod under study at $P < P_1$, but with the second number.

2. Rod with external location of supports (RELS). Here we consider a rod of arbitrary bending rigidity, containing a section of length ℓ compressed by a longitudinal force constant along its length, and having sections of length a and b on both sides of it free from compression (Fig. 3a).

It has been established that the critical force P of such a rod for arbitrary a , b , c_1 and c_2 cannot exceed its value P_1 for $a=b=0$ and $c_1=c_2=\infty$, i.e. the critical force of the compressed section supported by absolutely rigid hinged supports (as in Fig. 1b). Moreover, it cannot exceed the value

$$P^* = \frac{L^2}{\ell(1/c_1 + 1/c_2 + \delta_a + \delta_b)} = \frac{(\ell + a + b)^2}{\ell(1/c_1 + 1/c_2 + \delta_a + \delta_b)},$$

where δ_a и δ_b are respectively, the deflections of the left and right uncompressed sections of the rod, considered as independent cantilever rods, rigidly clamped in sections where compressive forces are applied, caused by a unit

transverse force applied at their ends. At $a=b=0$ P^* coincides with P_{RL} , defined above, at $\ell = L$.

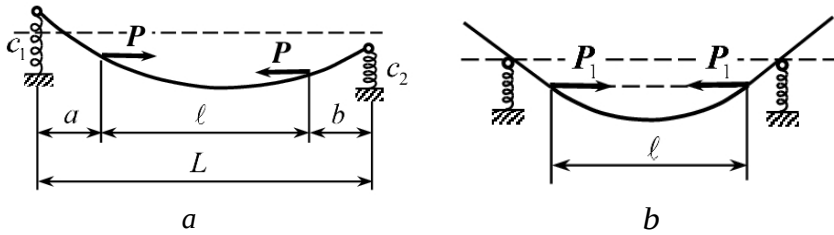


Fig 3. a – Rod with external location of supports (RELS)
 B – Typical buckling form of a RELS at $P = P_{\max} = P_1$

With the absence of restrictions on a and b there is an infinity of support positions at which the rod buckles in the absence of deformations (and reactions) of the supports at $P = P_1$. These positions are at the intersection of a straight line parallel to the axis of the undeformed rod and a line obtained from the form shown in Fig. 1b, by smooth conjugation with the straight sections on the left and right (Fig. 3b). When the rod buckles under the compressive force equal to P_1 , these sections remain unloaded and therefore rectilinear. In order for P_1 to be the maximum critical force $P_{\max}$ of the rod under study, it is necessary that there be no buckling forms corresponding to the values $P < P_1$. Such forms certainly exist for such a and b , at which $P^* < P_1$.

In this case, the reactions of the supports form a couple and the deflections on the supports have opposite signs (Fig. 4), and the slopes of the sections on the supports can have either same or opposite directions. The sections of the rod outside the supports remain rectilinear (dotted lines in Fig. 4). To increase the critical force, the support should be shifted to the right if its reaction is directed upward and the support section is turned clockwise (or downward and counterclockwise, respectively). In other cases, to increase the critical force, the support should be shifted to the left.

For example, in Fig. 4, shifting the right support to the right increases the critical force, and shifting the left support to the left decreases it. P as a function

of a or b is not monotonic. If, at a certain position of the left support, the right support should be shifted to the right to increase P , then at other positions of the left support, it may have to be shifted to the left.

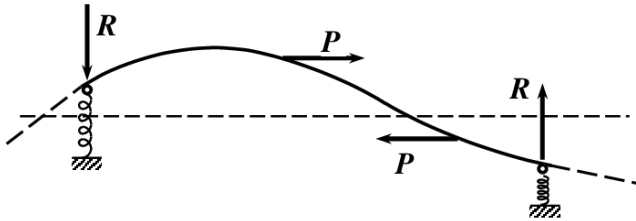


Fig 4. Typical buckling form of a RELS at $P < P_1$

ЩОДО УПРАВЛІННЯ КРИТИЧНОЮ СИЛОЮ ПРУЖНО ОПЕРТОГО СТРИЖНЯ

Роботу присвячено дослідженню поведінки основної критичної сили стрижня, шарнірно опертого на дві зосереджені опори довільної жорсткості, з довільним розподілом по довжині згинної жорсткості при змінах положень опор. Досліджуються випадки, коли положення опор не збігаються з точками прикладання поздовжніх сил. Зокрема, розглянуті стрижні з внутрішнім розташуванням опор, коли останні встановлені всередині ділянки, стиснутої постійною по довжині поздовжньою силою. Для них встановлені деякі оцінки основної критичної сили, вказані умови для визначення положень опор, які забезпечують максимальне значення критичної сили, виявлено, коли таких положень існує нескінченно багато, і вказано простий якісний спосіб для їх визначення. Запропоновані якісні ознаки зростання і зменшення критичної сили при зміні положень опор. Для деяких випадків якісно описані геометричні особливості основної форми втрати стійкості. Розглянуті також стрижні із зовнішнім розташуванням опор, в яких стиску зазнає лише певна частина стрижня, яка знаходиться всередині ділянки, обмеженої опорами. Для них також вказані оцінки для основної критичної сили, вказані умови існування безлічі положень, які забезпечують досягнення її максимуму, а також сформульовані ознаки зростання та зменшення критичної сили при зміні положень опор.

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РІЖУЧОГО ІНСТРУМЕНТА ШЛЯХОМ ДОДАТКОВОЇ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕРМООБРОБКИ ПІСЛЯ ЗАТОЧКИ

Чумаченко Т.В., д.т.н., проф.

Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса

Беспалова А.В., д.т.н., проф. Книш О.І., к.т.н., доцент

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Одним з основних напрямів удосконалення та розвитку машинобудівної промисловості є підвищення якості та ефективності механообробного виробництва.

Якість поверхневого шару після шліфування має задовольняти конструкторсько-технологічним вимогам з погляду шорсткості, точності, припиків, тріщин, зносостійкості, довговічності. Вивчення якісних властивостей поверхневого шару дозволяє визначити характер і природу впливу на ці властивості основних факторів процесу шліфування та дозволяє оптимізувати процеси обробки для досягнення найкращих характеристик якості деталей та ефективності їх виробництва.

Метод термічної обробки сталі з охолодженням в області низьких температур є продовженням загартування, яке було зупинено із-за того, що сталь прийняла кімнатну температуру, а не охолонула до температур закінчення мартенситного перетворення, до точки M_f . Цей метод в даний час має поширення та отримав назву обробка холодом. Теорія даних процесів, викладена головним чином у роботах Курдюмова Г.В.

Г.В. Курдюмов підкреслює, що основна відмінність мартенситного перетворення – сувора спрямованість відносних атомних переміщень. До основних характерних особливостей мартенситного перетворення слід зарахувати:

1) суворий кристалічний зв'язок між решітками аустеніту і мартенситу, що не виключає значної різноманітності орієнтування решітки мартенситу.

Відповідно механізму Курдюмова-Закса, таких орієнтувань може бути 24, в відповідності з механізмом Нішіямі -12:

2) високу швидкість перетворення;

3) перетворення процесу утворення зародків при основному охолодженні.

Тепловий стан тіла характеризується його температурою. Коли температура знижується, термореактивуючі ефекти в кристалічних тілах зменшуються: суттєво змінюються фізичні і механічні властивості.

Зміна механічних властивостей металів і сплавів при температурі залежать від виду кристалічної ґратки і недосконалості її будови, розміру

зерен, включень атомів легуючих елементів, фазового складу сплаву. На міцність і пластичність кристалічних тіл суттєво впливає кількість діючих у кристалічній ґратці систем ковзання, кількість і розподіл домішок, упорядкованість дислокаційної структури.

Дослідження механічних властивостей металів різної кристалічної будови показує, що охолодження зразків нижче 273°K наводить до підвищення межі міцності. При збереженні пластичності у металах та сплавах в умовах низьких температур зростає робота руйнування при динамічних навантаженнях та опір руйнуванню матеріалів при циклічних навантаженнях.

На низькотемпературну пластичність істотно впливає структурний стан сталі. Рівновісні структури сталі утворюються в результаті розпаду аустеніту при повільному охолодженні при низькотемпературній витримці.

Аустеніт в порівнянні з іншими структурами, що складають сталь має помірну твердість, середні значення межі міцності, низьку межу пружності і високу ударну в'язкість. Збільшення швидкості охолодження при кристалізації приводить до переохолодження аустеніту та змін структури сталі. При цьому поруч з структурно вільними феритом та цементитом, перлітом або мартенситом в сталі зберігається певна кількість залишкового аустеніту.

Мартенситне перетворення аустеніту супроводжується перегрупуванням атомів з γ - в α - решітку, при цьому весь вуглець залишиться, і утворює пересичений твердий розчин – мартенсит. В результаті значного спотворення кристалічної ґратки заліза вуглецем твердість сталі значно зростає.

Для розрахунку часу витримки свердла до заданої температури скористаємося методикою розрахунку охолодження циліндра кінцевої довжини.

Кінцевий циліндр можна розглядати як результат перетину безмежного циліндра розміром $2r$ та пластини товщиною δz (рис. 1). Отже, безрозмірну температуру для такого тіла можна записати так:

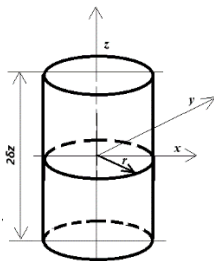


Рис. 1. Охолодження циліндра скінченної довжини.

$$\theta = \theta_z \cdot \theta_r \quad (1)$$

Розглянемо розподіл температур у безмежному циліндрі. Відлік температури циліндра вестиме від температури навколишнього середовища, тобто

$$\theta = t - t_{ж} \quad (2)$$

За цих умов рівняння теплопровідності набуває вигляду:

$$\theta_r = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{2I_1(\mu_n)}{\mu_n [I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n)]} \cdot I_0(\mu_n R) \exp(-\mu_n^2 F_0) \quad (3)$$

Граничні або початкові умови: при $\tau = 0$ і $0 \leq r \leq r_0$

$$\theta = \theta_0 = f(r) - t(ж) = F(r); \text{ при } \tau > 0 \text{ і } r = 0 \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right) = \theta$$

$$\text{при } \tau < 0 \text{ і } r = r_0 \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right) = -\frac{\alpha}{\lambda} \theta$$

Сформульоване завдання вирішимо за допомогою поділу змінних, тобто $\theta(r, \tau) = \varphi(r)\psi(\tau)$.

Підставляючи цей вислів у рівняння (3), отримаємо два звичайні диференціальні рівняння виду:

$$\varphi'(\tau) + ak^2 \varphi(\tau) = 0 \quad (4)$$

$$\psi''(r) + \frac{1}{r} \psi'(r) + k^2 \psi(r) = 0 \quad (5)$$

Після перетворень рівняння температурного поля набуває вигляду:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \sum \frac{2I_1(\mu_n)}{\mu_n [I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n)]} I_0 \left(\mu_n \frac{r}{r_0} \right) \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{r_0^2} \right) \quad (6)$$

Позначимо

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \Theta; \frac{r}{r_0} = R; \frac{a\tau}{r_0^2} - \text{число Фур'є для циліндра.}$$

З урахуванням цих позначень останній вираз запишеться у вигляді

$$\Theta = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{2I_1(\mu_n)}{\mu_n [I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n)]} I_0(\mu_n R) \exp(-\mu_n^2 F_0) \quad (7)$$

Таким чином, у формулі (6) визначається θ_r .

θ_r – визначається аналогічно до плоскої необмеженої пластини.

$$\Theta_r = \frac{2I_1(\mu_n)}{\mu_n [I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n)]} I_0(\mu_n R) \exp(-\mu_n^2 F_0)$$

Тепер розрахуємо час витримки в рідкому азоті свердла, виготовленого зі сталі Р6М5: $\beta_i = 0,7$; $\mu = 1,1$; $F_0 = 0,05\tau$

$$\text{Тоді } I_0(\mu) = 1 - \frac{1}{2^2} (1,1)^2 = 0,7; \quad I_1(\mu) = \frac{1}{2} \cdot 1,1 - \frac{1}{2^2 \cdot 4} (1,1)^3 = 0,47; \quad I_0(\mu R) \approx 1$$

$$\Theta_r = \frac{2 \cdot 0,47}{1,1[(0,7)^2 + (0,47)^2]} \exp(-1,21 \cdot 0,05\tau) = 1,2 \exp(0,6\tau)$$

$$\Theta_r = \Theta_r \cdot \Theta_z = 1,01 \cdot 1,2e^{-0,088} \quad \tau = 13 \text{ хв.}$$

Весь ріжучий інструмент за геометричною формою в ідеальному випадку можна розділити на циліндричний, і інструмент у вигляді паралелепіпеда. Все вище наведене для ідеальних випадків. Диференціальне рівняння теплопровідності має такі припущення:

- тіло однорідне та ізотропне;
- фізичні параметри постійні;
- деформація об'єму, що розглядається, пов'язана з вимірюванням температури, є дуже малою величиною в порівнянні з самим об'ємом.

Розрахунки велися для одиниці інструменту, зануреного у ванну з рідким азотом. У заводських умовах азотну ванну буде занурено n -оє кількість ріжучого інструменту. Внаслідок чого стикаються поверхні, отже, процес теплообміну дещо погіршиться.

Весь різальний інструмент має складну геометричну форму. Розрахунки проведені для тіл простої геометричної форми. В результаті час витримки інструменту в азотній ванні має бути збільшено на 5-15 хвилин.

У результаті проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

- для підвищення стійкості ріжучого інструменту доцільними є застосування низькотемпературної обробки як для готового інструменту, що пройшов повний цикл термічної обробки, так і в процесі термічної обробки, після загартування;
- найкращим середовищем для охолодження є рідкий азот;
- час охолодження ріжучого інструменту на швидкокорізальних сталях у рідкому азоті має становити 15-20 хвилин;
- оптимальна кількість циклів низькотемпературної обробки (при якій в металі створюються напруження, що сприяють найшвидшому розпаду аустеніту і перетворення його в мартенсит ріжучого інструменту становить 2-3 цикли.
- стійкість інструменту обробленого холодом підвищилася в середньому в 1,5 рази в порівнянні з інструментом, не обробленим в середовищі рідкого азоту.

INCREASING THE DURABILITY OF CUTTING TOOLS THROUGH ADDITIONAL LOW-TEMPERATURE HEAT TREATMENT AFTER SHARPENING

Cold treatment of a blade tool to cryogenic temperatures after sharpening can make it possible to significantly increase its stability. The purpose of processing hardened steel at a temperature below room temperature is to remove residual austenite from the structure and subsequently affects the properties of the steel. In the martensitic transformation interval, between the temperatures M_s and M_f , ordinary room temperature is a stop that interrupts the course of transformations during cooling. Thus, cooling below zero is a natural part of the steel hardening process.

УДК 624.155+69:04

ГЕОШУРУПИ: ІННОВАЦІЙНИЙ ФУНДАМЕНТ ДЛЯ СУЧАСНОГО БУДІВНИЦТВА

Вербицький С.М., студент, Макаренко О.В., к.т.н., доц.

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова,
м. Харків

Serhii.Verbytskyi@kname.edu.ua, Olha.Makarenko@kname.edu.ua

Гвинтові палі (геошурупи) є сучасною різновидністю пальових фундаментів, що являють собою сталеву трубу з загостреним кінцем і навитими навколо неї гвинтовими витками (рис. 1 [1]), які забезпечують проникнення в ґрунт та передачу навантаження за рахунок тертя та анкерного впливу витків на ґрунт [2]. Виготовляють їх із високоякісної сталі, найчастіше з гарячеоцинкованим покриттям згідно зі стандартом ASTM A123M, що гарантує корозійну стійкість не менше ніж 75 років експлуатації [3]. На виробництві виконують точне токарне формування витків, контроль товщини цинкування та, за потреби, додаткове порошкове чи епоксидне покриття, щоб адаптувати палі до агресивних ґрунтових умов або морського клімату [4, 5].



Рис.1. Гвинтові палі (геошурупи)

Окрім базової конструкції, що включає сталеву трубу та гвинтові витки, існує кілька варіацій геошурупів, розроблених для оптимізації їхньої роботи в різних ґрунтових умовах та для різних типів навантажень. Одним із ключових параметрів є кількість та конфігурація гвинтових витків. Для щільних і несучих ґрунтів можуть застосовуватися палі з одним або двома широкими витками, що забезпечують значну площу опори та високу несучу здатність на стискання та висмикування. У слабких або пухких ґрунтах ефективнішими можуть бути палі з більшою кількістю витків меншого діаметра, які забезпечують краще ущільнення ґрунту навколо стовбура палі та збільшують загальну площу тертя.

Важливим аспектом конструкції є діаметр стовбура палі та товщина стінки труби. Ці параметри визначають стійкість палі до згинальних навантажень та її загальну міцність. Для важчих споруд застосовуються палі зі збільшеним діаметром стовбура та товстішими стінками. Також існують телескопічні геошурупи, що складаються з кількох секцій, які можуть регулюватися по довжині під час монтажу, що особливо корисно на ділянках зі складним рельєфом або різною глибиною залягання несучих шарів ґрунту [6].

Окремо варто згадати про конструкцію наконечника палі. Загострений наконечник полегшує проникнення в ґрунт, а його форма може бути

оптимізована для різних типів ґрунтів. Наприклад, для твердих ґрунтів використовуються наконечники з підвищеною твердістю, а для м'яких – з більшою площею контакту для запобігання надмірному заглибленню.

Геошурупи широко застосовують для пристрою фундаментів модульних і каркасних будинків, житлових і дачних будівель, терас, навісів та інших легких споруд (рис. 2 [6]), де важлива швидкість монтажу й мінімальне втручання в ландшафт [7].



Рис.2. Фундамент на геошурупах

Вони можуть встановлюватися як вручну малими механізмами або за допомогою екскаватора з гідравлічним мотором, без попереднього буріння на нескелястих ґрунтах; в умовах гірських або щебенистих ґрунтів попередньо свердлять напрямні отвори, щоб не пошкодити антикорозійне покриття [8]. Монтаж геошурупів практично не залежить від погодних умов, потребує мінімального обсягу земляних робіт та не створює значних вібрацій чи шуму, що робить їх оптимальними для щільної забудови або чутливих екологічних зон [9]. Одним з перспективних напрямків є застосування геошурупів як елементів підпірних стін та протизсувних конструкцій. Завдяки своїй здатності ефективно сприймати як вертикальні, так і горизонтальні навантаження, геошурупи можуть використовуватися для стабілізації схилів та укосів, запобігаючи їхньому обваленню. Активно розвивається напрямок використання геошурупів у відновлюваній енергетиці, зокрема для встановлення сонячних панелей та вітрогенераторів. Серед нових розробок варто відзначити комбіновані геошурупні системи, що поєднують у собі

гвинтові палі з іншими елементами, такими як бетонні ростверки або металеві балки, для підвищення несучої здатності та розширення сфери застосування.

Основні переваги гвинтових паль полягають у високій швидкості та точності монтажу (несучу здатність кожної палі можна коригувати за допомогою контролю крутного моменту встановлення), відсутності потреби в очікуванні набору міцності бетону, економії на земляних роботах та бетоні, а також у можливості демонтажу й повторного використання палі після завершення будівництва [8]. До недоліків належать вища вартість одиначної палі у порівнянні зі стрічковим фундаментом при невеликих обсягах робіт, обмеженість застосування для масивних важких споруд і складність монтажу в ґрунтах із великими кам'яними включеннями або кореневими системами дерев [10]. Для забезпечення довговічності важливо дотримуватися вимог з корозійного захисту, контролювати крутний момент під час монтажу та виконувати періодичний моніторинг осідань і стану паль протягом перших шести-дванадцяти місяців експлуатації.

Ринок геошурупів в Україні має значний потенціал зростання завдяки економічним, технологічним та екологічним перевагам, що робить їх ефективною альтернативою традиційним фундаментам. Стимулом є зростання малоповерхового будівництва, де важливі швидкість монтажу та економія. Екологічність геошурупів, що зменшує використання бетону та вплив на ландшафт, також є вагомою перевагою. Враховуючи світові тенденції сталого розвитку, прогнозується активне впровадження геошурупів в українське будівництво, оптимізуючи процеси, знижуючи витрати та мінімізуючи екологічний вплив. Розширення асортименту та можливе зниження вартості сприятимуть їхній популярності.

[1]. ТОВ «Майнхаус» [Електрон. ресурс] : Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <https://mainhaus.com.ua/ua/p624649022-geoshurup-576502500.html>, (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.

[2]. Geoshurup – multi-threaded screw pile of the second generation. Foundations on geoscrews [Electronic resource] : Electronic text data. – Regime of access: <https://srubagruntowa.pl/en/>, free (date of the application: 12.05.2025). – Header from the screen.

[3]. Why is hot-dip galvanizing important? Postech Screw Piles. [Electronic resource] : Electronic text data. – Regime of access: <https://us.postechpiles.com/galvanisation/>, free (date of the application: 12.05.2025). – Header from the screen.

[4]. Why Choose Screw Piles for Home Extension? Goliath Tech Piles. [Electronic resource] : Electronic text data. – Regime of access: https://www.goliathtechpiles.com/why-choose-screw-piles-foundation-home-extension?utm_source=chatgpt.com, free (date of the application: 13.05.2025). – Header from the screen.

[5]. Do Postech Screw Piles rust? Postech Screw Piles FAQ [Electronic resource] :

Electronic text data. – Regime of access: <https://us.postechpiles.com/faq/faq-do-your-screw-piles-rust/>, free (date of the application: 12.05.2025). – Header from the screen.

[6]. What are ground screws? [Electronic resource] : Electronic text data. – Regime of access: <https://stopdigging.no/en-no/our-screws/>, free (date of the application: 13.05.2025). – Header from the screen.

[7]. Аполло [Електрон. ресурс] : Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <https://ireland.apollo.olxcdn.com/v1/files/ts3c1fiiz6wj3-UA/image:s=1024x576>, (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.

[8]. Screw Piles: Advantages and Disadvantages. UK Helix [Electronic resource] : Electronic text data. – Regime of access: <https://www.ukhelix.com/screw-piles-advantages-and-disadvantages/>, free (date of the application: 13.05.2025). – Header from the screen.

[9]. Installation of screw foundations. Effectbud [Electronic resource] : Electronic text data. – Regime of access: <https://srubagruntowa.pl/en/assembling/>, free (date of the application: 13.05.2025). – Header from the screen.

[10]. Concrete vs. Screw Piles: Which Foundation is Best? Structural Repairs [Electronic resource] : Electronic text data. – Regime of access: <https://structuralrepairs.com/a-foundation-guide-are-screw-piles-better-than-concrete-piles/>, free (date of the application: 13.05.2025). – Header from the screen.

GEOCREWS: AN INNOVATIVE FOUNDATION FOR MODERN CONSTRUCTION

У роботі представлено гвинтові палі (геошурупи) як інноваційний та сучасний тип пальового фундаменту, описано їхню конструкцію, що включає сталеву трубу з гвинтовими витками, та виробництво з антикорозійним покриттям. Розглянуто різновиди геошурупів, адаптовані до різних ґрунтів і навантажень, та їхнє широке застосування для легких споруд завдяки швидкому монтажу, а також ефективність для підпірних стін та у відновлюваній енергетиці. Проаналізовано переваги геошурупів, серед яких швидкість встановлення, економічність та можливість повторного використання, і недоліки, зокрема вартість при малих обсягах та обмеження для важких будівель. Підкреслено важливість корозійного захисту та якісного монтажу для надійної експлуатації. Окрему увагу приділено перспективам розвитку ринку геошурупів в Україні, зумовленим економічними й екологічними перевагами та світовими тенденціями сталого розвитку.

УДК 691.32/34

СТРУКТУРОУТВОРЮЮЧА РОЛЬ ТРІЩИН

**Вировой В.М., д.т.н., проф., Коробко О.О., д.т.н., доц.,
Суханов В.Г., д.т.н., проф.**

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Уявлення будівельної конструкції у вигляді складної системи, яка самоорганізується, передбачає що вона забезпечує своє цільове існування та функціонування в якості нероздільної цілісності внаслідок безперервної взаємодії елементів, що її складають [1]. Опис та аналіз конструкції-системи формує підходи, які не можуть бути виведені з базових уявлень діючої парадигми. Вплив тих чи інших елементів структури системи на її властивості не можна враховувати підбором емпіричних коефіцієнтів при аналізі неструктурованого середовища. Багаторічний досвід експлуатації будівельних виробів і конструкцій різних видів та призначення показав, що їх вихід з робочого стану пов'язаний з розвитком елемента, який має своєрідну кумулятивну дію – тріщини. Виділення тріщини в якості домінуючого елемента обґрунтовується її здатністю спонтанно концентрувати деформації та напруження біля свого устя (фронт тріщини). Її присутність в структурі не дозволяє використовувати осереднені характеристики. Це передбачає виникнення на всіх рівнях структурних неоднорідностей локальних невірноважених станів. Сукупність локальних невірноважених станів приводить всю систему в метастабільний стан, стимулюючи, тим самим, готовність до динаміки структурних перетворень, що свідчить про її поведінкову гнучкість.

Подання будівельного виробу як системи ґрунтується на тому, що: властивості виробу визначаються властивостями складових та сумісністю їх роботи; матеріал виробу є складноорганізованим (поліструктурним); параметри структури матеріалу автоматично стають параметрами структури виробу; зміна структурних характеристик при дії зовнішніх впливів викликає зміну властивостей матеріалу та, як наслідок, властивостей виробу, що може бути причиною зміни його функціонального призначення. Виріб виконує свої функції через набір певних властивостей, які залежать від характеру зовнішніх впливів. Зовнішні впливи, до яких відносяться нормовані силові навантаження та впливи, пов'язані з кліматичною дією середовища експлуатації, ініціюють структурні зміни матеріалу виробу. Властивості виробу не зводяться до властивостей складових, що визначається набором

структурних елементів, різноманітних за властивостями, та, особливо, рівнем взаємодії між структурними елементами та їх групами.

Життєвий цикл виробу-системи включає в себе час від моменту його виготовлення та періоду функціонування до виводу з режиму експлуатації. Вихід з нормованого режиму експлуатації пов'язаний, як правило, з такою еволюцією структури матеріалу, при якій активні структурні елементи досягають критичних розмірів. До активних елементів структури віднесені тріщини та внутрішні поверхні розділу (ВІПР), які в першу чергу реагують на вплив зовнішніх факторів, включаючи в роботу метастабільні та консервативні елементи. В результаті конкретні набори структурних елементів різних за видом і призначенням забезпечують рівень властивостей матеріалу та його стійкість в тих чи інших умовах експлуатації виробу.

Термін «тріщина» містить смисловий дуалізм, який є відображенням його діалектичної суперечності. Через це слід розділяти смислове навантаження даного терміну в залежності від тієї ролі, яку тріщина виконує в матеріалі. Відповідно до сучасних уявлень тріщина є основним фактором, що визначає руйнування виробів. При цьому процес руйнування зумовлюється незворотним ростом тріщини, яка розділяє виріб на окремі частини. Тріщина проходить певні етапи свого «життя», від моменту її зародження та росту до перетворення в магістральну з виходом фронту тріщини на поверхню зразка або виробу. Специфічна роль тріщини полягає у здатності концентрувати деформації та напруження біля свого устя, що значно полегшує процес її росту в середовищі матеріалу виробу.

Попередні дослідження дозволили встановити неминучість зародження та розвитку тріщин на рівнях різномасштабних структурних неоднорідностей матеріалів з поліструктурною будовою. Після утворення тріщини приймають активну участь в спонтанній організації структури матеріалу, визначаючи шляхи стабілізації властивостей виробу, чим забезпечують реалізацію його функціональних можливостей. Присутність тріщин у матеріалі виробу зумовлює перманентний невірноважений стан окремих підсистем та всієї системи в цілому, що сприяє генезису структури системи, збільшенню її структурного різноманіття та, як наслідок, переходу в більш рівноважний та стабільний стан. У той же час, основною причиною руйнування виробів є незворотний розвиток тріщин у матеріалі. Тому в загальному випадку під терміном «тріщина» слід розуміти не сам елемент структури як такий, а його структуроутворюючу або руйнівну роль в становленні чи збереженні структури матеріалу та виробу.

Характерний набір тріщин і внутрішніх поверхонь розділу присутній на всіх рівнях неоднорідностей структури бетону ще до початку функціонування виробу. Тим самим визначається неповторне структурне оформлення кожного окремого рівня по завершенні основних процесів

організації структури бетону. В силу поліструктурності бетону можна припустити, що інтегральний набір тріщин і ВПР має являти собою різномасштабну сітку структурних елементів.

Враховуючи вищевикладене, була поставлена задача – проаналізувати структуру бетону у вигляді складноорганізованої сітки активних елементів та виявити умови переходу від тріщин, які виконують структуроутворюючу роль, до тріщин, що спричиняють руйнування виробів.

«Велика» сітка тріщин і ВПР на рівні структури матеріалу включає в себе сітки тріщин і ВПР різномасштабних неоднорідностей.

Кожна окрема сітка в інтегральній сітці являє собою набір певних активних елементів на певному структурному рівні. При такій моделі подання матеріалу можна виділити зони взаємодії різнорівневих сіток-складових, в яких вони проявляють себе через внутрішньо- та міжструктурні зв'язки. При структурних змінах, викликаних внутрішніми або зовнішніми чинниками, відбувається формування іншого порядку в зонах переходу. Автоматично виникають структури, що є новими для кожної індивідуальної сітки і єдино досяжними для збереження взаємозв'язаної сітки активних елементів у матеріалі виробу як складної системи. У випадку неможливості вмонтування одиночних сіток в глобальну сітку, відбувається порушення взаємозв'язаності структурних елементів. При цьому виникає нерівномірне навантаження на окремі елементи сіток, припиняється передача інформації про стан окремих підсистем та порушується, в результаті, принцип автопідтримки, ще веде до формування принципово іншої структури бетону. Нова структура є активною через те, що її організація проявилася як відклик на утворення активних елементів з критичними параметрами. В прагненні до саморозвитку нова структура (сітка тріщин) перетворює базову систему (бетон) у склерономну систему з втратою здатності виконувати закладені в неї функції.

Одним зі шляхів підтримки безпечного функціонування виробу-системи в різних умовах експлуатації є збереження взаємозв'язків активних елементів на рівнях різномасштабних підсистем. Цього можна досягнути за рахунок направленої організації структури в технологічний період одержання матеріалу. До початку роботи виробу має бути створено певний набір активних елементів на всіх рівнях структурних неоднорідностей. Даний набір гарантує здійснення комплексу механізмів адаптації та дозволить уникнути ситуацій, кризових для матеріалу конкретного виробу.

Рушійною силою спонтанних процесів структурних перетворень є зміна параметрів невідновлених активних елементів при їх переході в відновлений стан. Спонтанна перебудова структури бетону при дії на вироб-систему несприятливих факторів, яка не викликає зміни властивостей об'єкту, пов'язана зі зміною параметрів активних елементів, що є необхідною

умовою самозбереження (адаптації) системи. Самовільна зміна параметрів активних елементів провокує виникнення нових для системи елементів – структурних блоків, які взаємодіють через внутрішні поверхні розділу та берега тріщин. Експлуатаційні тріщини, внутрішні поверхні розділу та структурні блоки спадково пов'язані з початковим набором активних елементів.

Здатність активних елементів шляхом змінювання власних параметрів ініціювати структурні зміни окремих підсистем виробу-системи та всієї системи загалом можна розглядати як структуроутворюючу роль тріщин.

Тріщини, що самозародилися на рівнях структурних неоднорідностей в період формування матеріалу, стабілізують метаморфози структури на своєму структурному рівні, активують роботу метастабільних елементів та можуть перетворюватися у внутрішні поверхні розділу, сприймати і перерозподіляти на своїх берегах градієнти об'ємних змін, що веде до релаксації деформацій та напружень й т.п. Наявність тріщин робить структуру матеріалу дисипативною, а їх співіснування на різних структурних рівнях дозволяє зробити висновок про фрактальність матеріалу виробу. Таким чином, структуроутворююча роль тріщин як об'єктивно існуючих елементів структури полягає в їх впливі на локальні структурні зміни бетону, що спрямовані на збереження властивостей матеріалу при експлуатації виробу.

В умовах дії експлуатаційних навантажень відбувається зміна структури матеріалу при активній участі в ній структуроутворюючих тріщин. У матеріалі виробу створюються окремі блоки на кожному рівні неоднорідностей. При цьому не виключені випадки автономної роботи кожного структурного блоку на окремих рівнях неоднорідностей. Процеси структурних змін усередині блоків можуть практично не змінювати міжблочну взаємодію, що сприяє одержанню заданого рівня параметрів. У свою чергу, такі структурні зміни вносять свій вклад у загальну структурну різноманітність системи. Завдяки цьому система виконує закладені в неї функції при постійній зміні структури. При досягненні певного критичного різноманіття в системі самозароджуються нові досить активні елементи структури – тріщини руйнування. В залежності від виду зовнішніх впливів та початкової структури причинами зародження нових елементів можуть бути критичні накопичення експлуатаційних тріщин в одиниці об'єму матеріалу та утворення тріщин руйнування при невеликій структурній різноманітності системи. В обох випадках тріщини руйнування утворюються, в основному, шляхом злиття експлуатаційних тріщин.

Для поліструктурних матеріалів зародження та початковий розвиток тріщин відбувається у технологічний період одержання матеріалу та його переробки в готовий виріб. Подальший опір руйнуванню в значній мірі буде

залежати від інфляції структуроутворюючої ролі початкових тріщин та їх переходу в ранг тріщин руйнування, чим визначається потенціал внутрішньої безпеки функціонування виробу.

[1]. Суханов В.Г., Вировой В.М., Коробко О.О. Структура матеріалу в структурі конструкції. Одеса: ОДАБА, 2022. 412 с.

THE STRUCTURE-FORMING ROLE OF CRACKS

The structure of concrete was analysed as a complexly organized network of active elements. The structure-forming role of cracks as objectively existing structural elements lies in their influence on local structural changes in concrete, which are aimed at preserving the properties of the material during the operation of the product.

УДК 621.9

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ТОЧНОСТІ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ КОМПОНОВОК ТА У ВИКОРИСТАННІ МОБІЛЬНИХ ПОРТАТИВНИХ ВЕРСТАТІВ АГРЕГАТНО- МОДУЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Вовк В.А., аспірант

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Загалом цифрові технології а саме, штучний інтелект - це адаптивні алгоритми машинного навчання, які мають змогу виявляти приховані похибки, неточності та обробляти великі обсяги інформації. Його можна ефективно використовувати для різних цілей а саме: прогнозувати похибки обробки залежно від конфігурацій верстата, управляти режимами обробки з урахуванням реальних умов, оптимізувати компоновки для досягнення максимальної жорсткості, компенсувати термомеханічні деформації у реальному часі, автоматично виявляти закономірності у великих обсягах даних, адаптивно навчатися в реальному часі, моделювати нелінійні залежності між параметрами верстата результатом обробки. Було розглянуто основні напрями застосування штучного інтелекту у мобільних портативних верстатах: компенсація навантажувальних і температурних впливів, можливість прогнозування похибок в обробці, стабілізація положення інструмента у вібраційному середовищі.

Використання штучного інтелекту у портативних верстатах має свої переваги - це здатність самонавчатися, висока гнучкість, точне моделювання складних систем, краща точність. При проектуванні й налаштуванні верстатів штучний інтелект здатний аналізувати багато інформації та забезпечувати високу точність. Він має можливість враховувати всі прогнози та параметри, що в свою чергу дозволяє досягати оптимальних результатів обробки. Штучний інтелект (ШІ) допомагає у виборі найкращих параметрів в процесі обробки, цим самим зменшуючи кількість помилок та забезпечуючи ефективність роботи. Також можна виділити, що ШІ адаптується до нових умов та змін у матеріалах. Це дозволяє підвищити гнучкість верстатів. В процесі обробки штучний інтелект може передбачити несправності, що надасть змогу запобігти поломкам і знизити вартість витрат на ремонт. Для того щоб підтримувати стабільну якість, інтелектуальні системи автоматично корегують параметри роботи. Було розглянуто можливість штучного інтелекту налаштовувати верстат без втручання оператора. Це зменшує час на переналаштування і підвищує продуктивність. Щоб зменшити витрати на матеріали та збільшити економічну ефективність роботи верстатів, система має можливість оптимізовувати використання різних енергоресурсів та матеріалів [1].

[1]. *Малина І.В.* Штучний інтелект: сучасні підходи та застосування в інженерії // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2020. – №1. – С. 12–17.

THE USE OF DIGITAL TECHNOLOGIES TO ENSURE ACCURACY IN THE DESIGN OF LAYOUTS AND IN THE APPLICATION OF MOBILE PORTABLE MACHINES OF AGGREGATE-MODULAR CONSTRUCTION

In general, digital technologies—particularly artificial intelligence—refer to adaptive machine learning algorithms capable of identifying hidden errors, inaccuracies, and efficiently processing large volumes of data. AI can be effectively applied in a variety of contexts, including: predicting machining errors based on machine configuration, managing processing modes according to real-world conditions, optimizing setups for maximum structural rigidity, compensating for thermomechanical deformations in real time, automatically detecting patterns in extensive datasets, learning adaptively in real time, and modeling nonlinear relationships between machine parameters and processing outcomes. Key areas of AI application in mobile and portable machine tools have been analyzed, including compensation for loading and thermal influences, the error prediction during processing, and stabilization of tool positioning in environments affected by vibration.

УДК 539.3

ВПЛИВ УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЖОРСТКИХ ПІНОПОЛІУРЕТАНІВ

Войтюк І.М., аспірант, Мікуліч О.А., д.т.н., проф.,

Фурс Т.В., к.т.н., доц., Шемет В.Я., к.х.н., доц.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

Пінополіуретани (ППУ) – це різновиди полімерних матеріалів з пористою (комірковою) структурою, які одержуються у результаті реакції синтезу шляхом змішування поліолу та ізоціанату (основні компоненти) з додаванням спінювача й інших модулюючих компонентів [1]. Завдяки модифікуванню рецептури компонентів можна змінювати властивості й, отже, - асортимент ППУ (від м'яких еластичних матеріалів) до твердих і жорстких), розширюючи сфери їх застосування. Завдяки цьому поліуретанові піни є універсальним матеріалом, затребувані та ефективні у багатьох галузях й використовуються в широкому спектрі практичних рішень [2]. Зокрема, такі матеріали ефективні для виготовлення виробів в автомобільній, меблевій, легкій промисловості [3], [4], у медицині [5], [6], у будівельній галузі в якості утеплювачів [7], для гідро- та звукоізоляції [8], [9].

Втім, під час експлуатації вироби з ППУ часто зазнають не лише механічних навантажень, а й інших зовнішніх впливів (температура, вологість, ультрафіолетове (УФ) випромінювання). Тому дослідження поведінки цих матеріалів в експлуатаційних умовах є важливими і доцільними щодо їх ефективного й економічно вигідного практичного застосування.

У даній роботі досліджували вплив ультрафіолетового випромінювання, як деградуючого фактору, на хімічну структуру та механічні властивості пінополіуретанів.

Об'єктом дослідження був жорсткий пінополіуретан, отриманий способом заливки в ємність реакційної суміші на основі поліізоціанату та поліолу у ваговому співвідношенні 2:1 з додаванням каталізаторів, стабілізаторів, спінювача і антипіренів. З отриманих композицій вирізали дослідні зразки кубічної форми ($30 \times 30 \times 30$ мм³), які розділили на дві групи за етапами досліджень. Першу групу зразків досліджували відразу після виготовлення, а другу – після тривалого витримування (3 місяці) при впливі УФ-випромінювання (денного світла).

Вивчення структури ППУ на виявлення хімічних змін при впливі УФ-випромінювання здійснювали методом інфрачервоної спектроскопії з

використанням ІЧ-Фур'є-спектрометра IRAffinity-1S (Японія). Досліджували поверхневий шар (товщиною 1 мм) і внутрішню частину УФ-опромінених зразків у порівнянні з матеріалом без ультрафіолетового впливу.

Дослідженнями встановлено, що поглинання УФ-променів викликає фотоокислення певних функціональних груп ППУ з утворенням карбонільних ($-C=O$) і гідроксильних ($-OH$) груп, характерних для продуктів деградації поліуретану. Ці реакції поєднуються з пожовтінням поверхні ППУ. При цьому істотного руйнування хімічної структури поверхні УФ-опромінених зразків не спостерігалось. Помітних хімічних змін внутрішньої частини УФ-опромінених зразків не було виявлено, і ця частина матеріалу не піддалася фотостарінню.

Товщина шару деградованої піни після 3 місяців УФ-опромінення досягає товщини 0.5 ... 0.8 мм, що в основному характеризується зміною кольору піни.

Отримані результати аргументуються тими даними, що жорсткі пінополіуретани більш щільні за структурою (мають більшу густину) у порівнянні з м'якими еластичними ППУ і мають високий відсоток закритих пор. Тому такі піни із закритими осередками не дозволяють газам легко виходити з неї та не дозволяють повітрю й сонячному випромінюванню входити у піну (крім тонкого поверхневого шару) і хімічно взаємодіяти з внутрішньою частиною матеріалу.

Дослідження поведінки ППУ під дією механічних навантажень визначали за результатами випробування дослідних зразків на стиснення методом статичного навантаження з використанням випробувальної машини марки МІ-40КУ. За результатами деформування зразків встановлено зміни механічних характеристик при впливі тривалої дії природного УФ-випромінювання (табл. 1).

Таблиця 1
Механічні характеристики дослідних зразків ППУ

Зразки ППУ	E, МПа	$\sigma_{пр}$, МПа	$\sigma_{пл}$, МПа	δ_{5m} , %
Група 1 (без УФ-опромінення)	10.07	0.919	1.069	4.1
Група 2 (УФ-опромінені)	15.44	0.943	1.219	2.97

* δ_{5m} – відносна залишкова деформація зразків через 5 хв після зняття навантаження

Висновок. Дія природного УФ-випромінювання протягом 3 місяців призвела до помірної фотодеградації поверхневого шару ППУ товщиною до

Імм без помітних змін хімічної структури внутрішньої частини зразків. Водночас для УФ-опромінених зразків відбулося підвищення величини модуля Юнга на 53%, зростання границі пропорційності на 2,6 % й границі плинності на 14 %, а відновлення деформованих внаслідок статичного стиснення зразків (через 5 хв після зняття навантаження) відбувається повільніше на 38 %.

Тому, можна стверджувати, що жорсткі ППУ помірно стійкі до УФ-випромінювання протягом періоду часу до 3 місяців. Це означає, що їх можна використовувати в різних сферах без додаткового УФ-захисту з коротким часом впливу УФ-променів. У випадку тривалого (багаторічного) впливу ультрафіолетового випромінювання важливо захищати зовнішні шари пінополіуретанів, щоб запобігти їх деградації, зберегти функціональні властивості та запобігти передчасному старінню.

- [1] Abdullah, M.; Ramtani, S.; Yagoubi, N.: Mechanical properties of polyurethane foam for potential application in the prevention and treatment of pressure ulcers. *Results in Engineering*. 19, 101237 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101237>
- [2] Ates M., Karadag S., Eker A.A. and Eker B. Polyurethane foam materials and their industrial applications. *Polym. Int.* 2022. 71: 1157-1163. <https://doi.org/10.1002/pi.6441>
- [3] H. Wu, Y. Shu, Y. Liu Engineering performance of polyurethane bonded aggregates. *Materials Science*. 23 (2) (2017), 166-172. DOI: [10.5755/j01.ms.23.2.15798](https://doi.org/10.5755/j01.ms.23.2.15798)
- [4] Dong, H.; Li, S.; Jia, Z.; Luo, Y.; Chen, Y.; Jiang, J.; Ji, S. A Review of Polyurethane Foams for Multi-Functional and High-Performance Applications. *Polymers*, 16, 3182 (2024). <https://doi.org/10.3390/polym16223182>
- [5] Horak, Z.; Dvorak, K.; Zarybnicka, L.; Vojackova, H.; Dvorakova, J.; Vilimek, M. Experimental Measurements of Mechanical Properties of PUR Foam Used for Testing Medical Devices and Instruments Depending on Temperature, Density and Strain Rate. *Materials*, 13, 4560 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13204560>
- [6] Gefen, A., Alves, P., Beeckman, D., Lázaro-Martínez, J. L., Lev-Tov, H., Najafi, B., Swanson, T., & Woo, K. Mechanical and contact characteristics of foam materials within wound dressings: Theoretical and practical considerations in treatment. *International wound journal*, 20(6), 1960–1978 (2023). <https://doi.org/10.1111/iwj.14056>
- [7] Harith, I.K. Study on polyurethane foamed concrete for use in structural applications Case Stud. *Constr. Mater.*, 8, 79-86(2018). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.11.005>
- [8] S. Abu Dabous, T. Ibrahim, S. Shareef, E. Mushtaha, I. Alsyouf: Sustainable façade cladding selection for buildings in hot climates based on thermal performance and energy consumption. *Results in Engineering*, 16, 100643 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100643>
- [9] Etemad, S., Kantzas, A., Bryant S.: A systematic analysis of foam drainage: experiment and model. *Results in Engineering*, 15, 100551 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100551>

THE EFFECT OF ULTRAVIOLET RADIATION ON THE STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RIGID POLYURETHANE FOAMS

The paper investigates the effect of ultraviolet (UV) radiation on the structural and mechanical characteristics of rigid polyurethane foam. Analysis of IR spectra revealed minor changes in the chemical structure of the outer surface of the samples as a result of exposure to UV radiation for 3 months. No noticeable chemical changes were found in the inner part of such samples. Studies of mechanical characteristics were carried out during compression tests of samples under static load. Based on experimental tests, changes in the values of mechanical, strength, and deformation characteristics were investigated: Young's modulus, elastic strength, yield strength, and degree of deformation recovery. A conclusion was made about the resistance of polyurethane foam to ultraviolet influence for a period of up to three months.

УДК 691.311:621.742.45

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІПСОБЕТОНУ З ОРГАНІЧНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ

Горб О.Г., к.т.н., доц.

Державний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ,
oleksandr.horb@npp.kai.edu.ua

Авраменко Ю.О., к.т.н., доц.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
м. Полтава, ab.avramenko_uo@nupp.edu.ua

Гіпсобетон – це різновид бетону, в якому в'язким матеріалом є гіпс, а заповнювачами – різноманітні матеріали, такі як шлак, цегляний щебінь, керамзит, пісок, тирса, стружка, костриця та інші. В залежності від виду та об'єму органічного наповнювача, такий бетон можна віднести до біобетонів, дослідження яких зараз є дуже актуальним та популярним у світі [1-5].

Завдяки своїм властивостям гіпсобетон зазвичай використовується для внутрішніх робіт у якості оздоблювального матеріалу чи перегородок, однак при введенні водовідштовхувальних добавок він може виконувати функції утеплювача.

Відомо, що в сучасному житловому будівництві вартість перегородок становить близько 10% від загальної вартості будинку. Тому їх здешевлення має велике значення для загальної економічності кінцевого продукту.

В даний час одним з найбільш прийнятних матеріалів у виробництві плит і панелей для перегородок є легкий бетон на основі будівельного гіпсу і різноманітних легких заповнювачів (в основному шлаків і відходів деревообробної промисловості).

Застосування будівельного гіпсу зумовлене його позитивними властивостями, а саме: швидким схоплюванням і твердінням, що дає змогу витягати вироби з форм через 30-40 хвилин і забезпечувати високу оборотність формувального обладнання. Оскільки шлак для більшості регіонів є дефіцитним немісцевим матеріалом, тому для галузі представляє інтерес використання різноманітних розповсюджених органічних наповнювачів, зокрема, – подрібнених стрижнів кукурудзяних качанів і будівельного гіпсу для виготовлення плит і панелей внутрішніх ненесучих перегородок.

Були проведені дослідження легкого бетону для зазначених вище плит і панелей перегородок. Визначено оптимальні склади бетону та його фізико-механічні властивості (об'ємна вага, межа міцності під час стискання та вигину, водостійкість, гігроскопічність та інші).

Випробування проведено на фракціонованому і нефракціонованому щєбені.

Для проведення експерименту були виготовлені зразки-куби, розміром 7,07х7,07х7,07 см із гіпсобетону складу 1:2 за об'ємом. Випробування проводили після висушування зразків до постійної ваги.

Таблиця 1

Результати випробувань гіпсобетонних кубів

Розмір фракції, мм	Об'ємна вага гіпсобетону, кг/м ³	Межа міцності при стисненні, МПа
20-30	800	7,5
10-20	850	10,6
5-10	800	8,0
3-5	810	7,2
1,25-3	800	3,5
0,63-1,25	870	2,6
0,31-0,63	1020	2,48
0,14-0,3	1030	3,7
Нефракціонована суміш	800	5,8

Встановлено, що зменшення розміру фракції заповнювача тягне за собою зниження міцності бетону та збільшення об'ємної ваги, а також значно уповільнює період схоплювання бетонної суміші.

Зразки гіпсобетону на фракції 20-30 і 10-20 мм після розопалублювання вкривалася сіткою тріщин, але після висушування тріщини скорочувалися і ставали майже непомітними. Міцність їх вища, ніж зразків на дрібних фракціях.

Очевидно утворення тріщин відбувалося з тієї причини, що після схоплювання гіпсу збільшується об'єм заповнювача за рахунок поглинання ним вологи з гіпсобетону.

Припускаючи, що міцність зразків на великих фракціях заповнювача могла бути збільшена за рахунок ліквідації утворення тріщин, було зроблено спроби уникнути цього явища наступним чином:

- 1) повним насиченням біонаповнювача водою до приготування бетону;
- 2) попереднім просоченням біонаповнювача у гарячому петролатумі при $t = 250 - 270^{\circ}\text{C}$ протягом 3-5 хвилин з метою отримання стабільного заповнювача;
- 3) попереднє проварювання біонаповнювача у 1% розчині їдкого натрію з метою видалення з їх складу ксилану, що сильно набухає у воді та розчинний у лузі.

У результаті експериментальної перевірки цих припущень з'ясовано, що перші два способи обробки стрижнів дали змогу ліквідувати тріщиноутворення та збільшити міцність зразків у 2,5 раза (2,3-2,5 МПа), але, використовуючи попередньо насичений водою наповнювач, зразки довго сохли і в період сушіння незначною мірою вкривалися пліснявою. Останнє явище зовсім не спостерігалось в зразках, приготованих зі стрижнів, просочених у петролатумі. Проварювання стрижнів в 1% розчині їдкого натрію не дало позитивних результатів, а ще більше посилювало тріщиноутворення. Отримані результати показують, що органічні відходи, оброблені їдким натром, збільшують свою набрякаючу здатність, пояснюючи це явище збільшенням ксилану. Таким чином, були визначена оптимальна технологія отримання гіпсобетонної суміші придатної до використання в будівництві.

[1]. Mahmoud Abu-Saleem & Joseph M. Gattas. (2024). Eccentric compression behaviour of hybrid timber-cardboard sandwich columns. *Construction and Building Materials*, Vol. 440, 137365. ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137365>.

[2]. Cosentino L. & Fernandes J. & Mateus R. (2024) Fast-growing bio-based construction materials as an approach to accelerate united nations sustainable development goals. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14 (11), DOI: 10.3390/app14114850.

[3]. Sutkowska M. & Stefańska A. & Vaverkova M.D. & Dixit S. & Thakur A. (2024) Recent advances in prefabrication techniques for biobased materials towards a low-carbon future: from modules to sustainability. *Journal of Building Engineering*, 91. DOI: 10.1016/j.jobee.2024.109558.

[4]. Mohanadoss Ponraj & Talaie Amirreza & Rosli Mohamad & Mohamad zin Rosli & Abd Majid & Muhd Zaimi et al. (2015). Bioconcrete Strength, durability, permeability, recycling and effects on human health: a review. DOI:10.15224/978-1-63248-062-0-28.

[5]. Pandya Pranav & Chunti Kisun & Imboon Tanawat & Polsilapa Sureerat & Thongmee Sirikanjana & Ghosh Sougata (2022). Bioprospecting of Biofilm Producers for Bioconcrete Production. Advances in Materials Science Research, Nova Science Publishers, (Chapter 3), (pp. 81-101).

EXPERIMENTAL RESEARCH OF GYPSUM CONCRETE WITH ORGANIC FILLER

The thesis provides some information about gypsum concrete, its applications, and the advantage of using organic fillers compared to mineral ones. The optimal technology for the production of gypsum concrete mix was determined, and an economically attractive type of organic filler in the form of chopped corn stalks was established. The compressive strength of the resulting material was studied depending on the fraction of crushed stone used. The fictitious methods of combating shrinkage cracks at the stage of manufacturing prototypes are determined, which increases the bearing capacity of the samples by 2.5 times.

УДК 539.3

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ПОЛОСИ З ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ НА ЖОРСТКІЙ ОСНОВІ

Глухов Ю.П.,

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

Досліджено динамічний відгук на поверхневе навантаження, що рухається з постійною швидкістю, поперенью напруженої полоси на жорсткій основі.

Постановка задачі. Розглядається попередньо напружена полоса товщиною h з стисливого або настисливого матеріалу з довільним пружним потенціалом. Граничні поверхні плоскі і паралельні між собою. Матеріал полоси – ізотропний в ненапруженому стані. Початковий напружено-деформований стан півпростору вважається однорідним. Зосереджена сила

інтенсивності P рухається по вільній поверхні захисного шару з постійною швидкістю v під кутом α до поверхні полоси.

Розглядається два варіанти контакту між шаром і основою: жорсткий і нежорсткий.

Передбачається, що картина деформацій інваріантна відносно часу в системі координат, що рухається разом з навантаженням. Також передбачається, що напруження, що виникає за рахунок дії навантаження, значно менше за початкові напруження. Вказане припущення дозволяє застосовувати лінеаризовану теорію пружності [1] для опису додаткового напруженого стану, викликаного дією навантаження.

При таких припущеннях з урахуванням загальних розв'язків плоских динамічних задач лінеаризованої теорії пружності для тіл з початковими напруженнями рівняння руху полоси можна записати у вигляді [1]

$$\left(\eta_1^2 \frac{\partial^2}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_2^2} \right) \left(\eta_2^2 \frac{\partial^2}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_2^2} \right) \chi^{(j)} = 0; \quad j = 1, 2. \quad (1)$$

Функції η_j в рівняннях руху (1) визначаються з рівняння

$$\eta^4 + 2A\eta^2 + A = 0, \quad (2)$$

де для стисливого тіла

$$\begin{aligned} 2A\tilde{\omega}_{2222}\tilde{\omega}_{2112} &= \tilde{\omega}_{2222}(\tilde{\omega}_{1111} - \tilde{\rho}v^2) + \tilde{\omega}_{2112}(\tilde{\omega}_{1221} - \tilde{\rho}v^2) - (\tilde{\omega}_{1122} + \tilde{\omega}_{1212})^2; \\ A_1\tilde{\omega}_{2222}\tilde{\omega}_{2112} &= (\tilde{\omega}_{1111} - \tilde{\rho}v^2)(\tilde{\omega}_{1221} - \tilde{\rho}v^2); \quad \tilde{\rho}\lambda_1\lambda_2\lambda_3 = \rho; \end{aligned} \quad (3)$$

а для нестисливого тіла

$$\begin{aligned} 2A\tilde{q}_{22}^2\tilde{z}_{2112} &= \tilde{q}_{11}^2\tilde{z}_{2222} + \tilde{q}_{22}^2(\tilde{z}_{1111} - \tilde{\rho}v^2) - 2\tilde{q}_{11}\tilde{q}_{22}(\tilde{z}_{1122} + \tilde{z}_{1212}); \\ A_1\tilde{q}_{22}^2\tilde{z}_{2112} &= \tilde{q}_{11}^2(\tilde{z}_{1221} - \tilde{\rho}v^2); \quad \tilde{q}_{ij} = \delta_{ij}\lambda_i q_i; \quad \tilde{\rho} = \rho; \end{aligned} \quad (4)$$

В формулах (3) і (4) λ_i – відносне видовження, ρ – щільність матеріалу півпростору в природному стані, q_i , $\tilde{q}_{ij}$, $\tilde{z}$, $\tilde{\omega}$ – параметри, що характеризують матеріал півпростору [1].

Межа розділу полоси і жорсткої основи: $y_2 = -h$. Граничні умови при жорсткому контакті можна записати: при $y_2 = 0$

$$\tilde{Q}_{21} = P_1 \delta(y_1); \quad \tilde{Q}_{22} = P_2 \delta(y_1); \quad (5)$$

і при $y_2 = -h$

$$u_1 = 0; \quad u_2 = 0; \quad (6)$$

В виразах (5) і (6) u_1, u_2 - переміщення точок полоси, $\tilde{Q}_{21}$ і $\tilde{Q}_{22}$ - дотичне та нормальне напруження в полосі відповідно, $\delta(y_1)$ - дельта-функція Дірака.

Таким чином, задача зводиться до визначення функцій $\chi^{(j)}$ з допомогою рівнянь (1) при граничних умовах (5) і (6).

Розв'язок задачі отримано за допомогою інтегрального перетворення Фур'є по змінній y_1 .

Чисельні дослідження. Чисельні дослідження проведені в рамках теорії скінченних початкових деформацій для матеріалу з пружним потенціалом типу Бартенєва-Хазановича і потенціалом гармонічного типу [1].

На рис. 1 і 2 показаний розподіл узагальнених напружень $\tilde{Q}_{22}$ в полосі при $y_2 = -h/(2\lambda_2)$ для різних матеріалів пружної полоси.

Швидкість поверхневого навантаження – дозвукова $v^2/c_0^2 = 0.1, c_0^2 = \mu / \rho$.

Решта параметрів мають значення: $P/\eta = 0.5$; $\nu = 0.25$; $\alpha = \pi/2$.

Тут і на рисунках P - зовнішнє навантаження, α - кут нахилу навантаження, η - модуль зсуву, ρ - щільність матеріалу в природньому стані, ν - коефіцієнт Пуасона, λ_1 - видовження.

Криві 1,2, 3 на рис. 1 і 2 відповідають значенням $\lambda_1 = 0.9$, $\lambda_1 = 1$, $\lambda_1 = 1.1$.

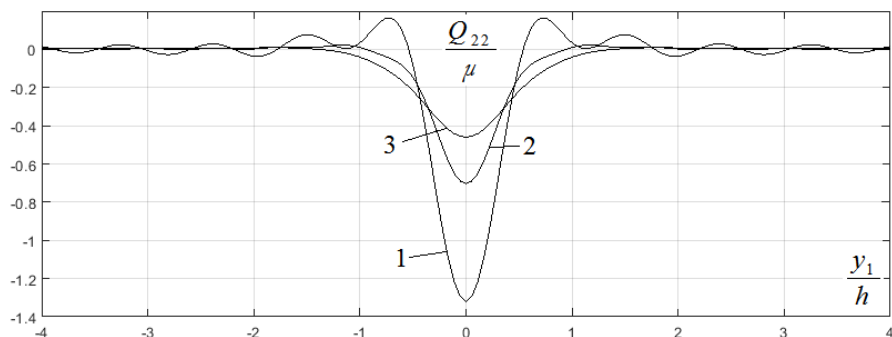


Рис. 1. Потенціал Бартенева-Хазановича

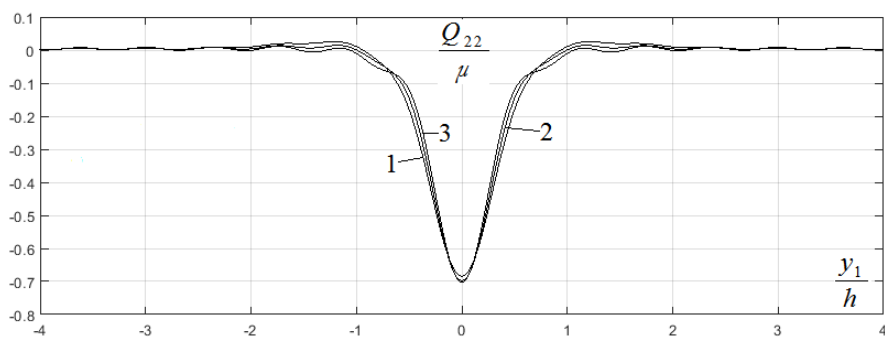


Рис. 2. Гармонічний потенціал

Значення параметрів, що характеризують напружено-деформований стан полоси, визначаються координатами точки, що досліджується, початковими напруженнями, швидкістю навантаження та механічними параметрами шаруватого середовища.

[1]. Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями. – Киев: “А.С.К”, 2004. – 672 с.

STRESS-STRAIN STATE OF THE STRIP WITH INITIAL STRESSES ON THE RIGID BASE

The dynamic response of a prestressed strip on a rigid base to a surface load moving at a constant speed is investigated.

УДК 621.924.9

АСПЕКТИ РУЙНУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ДРОБОСТРУМІННІ

**Горик О.В., д.т.н., проф., Ковальчук С.Б., д.т.н., проф.,
Брикун О.М., к.т.н., доц., Камишов С.С., аспірант**

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава

У процесі виготовлення, ремонту металевих виробів різних галузей промисловості виникає нагальна потреба в якісній підготовці вільних поверхонь для нанесення на них захисних стійких неметалевих покриттів. Якість підготовки поверхонь, як одного із головних факторів міцного зчеплення із робочим захисним покриттям, є визначальним критерієм довговічності й надійної експлуатації одиниць техніки. Серед механічних способів підготовки (очищення) пріоритетне місце займає екологічно чистий і енергоощадний процес дробоструміння. При цьому поверхня піддається різним за своєю природою видам руйнування: абразивному, адгезійному, дифузійному, хімічному, окислювальному, тощо, залежно від умов динамічної взаємодії тіл.

Механізм та міра інтенсивності руйнування поверхневого шару визначає основні наслідкові параметри технології дробоструминного очищення, серед яких: продуктивність, швидкість переміщення факела, економічний період стійкості дробу та інші параметри, розрахункове встановлення яких дозволяє створювати енергозберігаючі технологічні комплекси.

Якість підготовки металевих поверхонь дробострумінням залежить від багатьох факторів і пов'язана з руйнуванням поверхневого шару, коли формується необхідна шорсткість, яка за дослідженнями [1] сприяє надійному зчепленню захисного покриття із сталеву підкладку, але до певної міри її збільшення [2]. Встановлення закономірностей механізму очищення поверхонь металевих виробів через коефіцієнт руйнування, що пов'язаний з вихідними режимами дробоструміння, дозволяє збалансувати

усі параметрами процесу до його початку для отримання заданої якості підготовки поверхні й є предметом даного повідомлення.

Експериментальні дослідження процесу руйнування металевих поверхонь внаслідок ударної дії на них дробинок виконувалися у два етапи. Перший – лабораторні дослідження впливу однієї дробинки на оброблювану поверхню, другий – заводські дослідження впливу на процес руйнування поверхні масової дії дробу у вигляді факелу. Методика проведення дослідів та матеріали описані в [3, 4].

Коефіцієнт руйнування k_p характеризує залежність між об'ємом металу $w_{вид}$, що видаляється у вигляді мілких частинок і об'ємом деформованого металу $w_{деф}$, тобто об'ємом деякої множини сферичних лунок, залишених дробинками на атакованій поверхні

$$k_p = w_{вид} / w_{деф} . \quad (1)$$

Коефіцієнт руйнування k_p при дії на поверхню дробоструміння можна трактувати як суму різних за фізичною природою його складових, основні із яких: коефіцієнт втомного руйнування $k_{вт}$ і коефіцієнт руйнування внаслідок мікрорізання $k_{мр}$. Інші складові за оцінками фахівців складають незначну долю, то їх значеннями можна знехтувати і записати

$$k_p = k_{вт} + k_{мр} . \quad (2)$$

Слід відмітити, що міра впливу окремих другорядних чинників на значення узагальненого коефіцієнта руйнування k_p практично залишається сталою при зміні режимів процесу у межах рекомендованих. Це дозволяє встановити інтегрований підхід до визначення коефіцієнта руйнування, максимально пов'язавши його з вихідними параметрами (режимами) процесу, зменшивши емпіричну частку розрахунку.

Об'єм лунки, як результат динамічної взаємодії дробинки з металевою поверхнею нерухомого тіла, інтегрує в собі вихідні параметри технології дробоструміння, пов'язані із заданими діаметром дробинки d , кутом атаки α , швидкістю атаки v та фізико-механічними властивостями атакованого тіла. Це дозволило запропонувати можливий підхід до встановлення коефіцієнта руйнування металевих поверхонь залежно від заданих параметрів дробоструміння і збалансування наслідкових характеристик технологічного процесу, пов'язавши його із коефіцієнтом лунки, як прототипом коефіцієнта руйнування

$$k_l = w_l / w_{оп} = 6\zeta_w (v \sin \alpha)^2 m / (\pi d^3 H D) , \quad (3)$$

де w_l – об'єм лунки (сліду) дробинки на атакованій поверхні, що відповідає

об'єму деформованого металу однією дробинкою; $w_{op} = (\pi d^3)/6$ – об'єм атакуючої дробинки; ς_w – коефіцієнт видовження сліду (лунки), викликаного тангенціальним переміщенням центру мас дробинки, який при куті атаки $\alpha = 90^\circ$ становить $\approx 0,5$, при $\alpha = 60^\circ \approx 0,6$, при $\alpha = 30^\circ \approx 0,8$; m – маса дробинки; HD – динамічна твердість металу виробу.

Пов'яжемо коефіцієнт лунки k_λ з коефіцієнтом руйнування k_p у такий спосіб. Формулу (2) запишемо через складові коефіцієнта лунки так:

$$k_p = z_n k_{\lambda,n} + z_\tau k_{\lambda,\tau}, \quad (4)$$

де z_n , z_τ – коефіцієнти, що інтегрально враховують частку металу поверхневого шару виробу, що руйнується внаслідок втоми і мікрорізання відповідно; $k_{\lambda,n}$ – складова коефіцієнта лунки, що відповідає зануренню дробинки по нормалі, й який стосується частини об'єму лунки $w_{\lambda,n} = \pi h(3dh - 2h^2)/6$ сферичної форми; $k_{\lambda,\tau}$ – складова коефіцієнта лунки, що безпосередньо пов'язана з тангенціальним видовженням лунки $k_{\lambda,\tau} = k_\lambda - k_{\lambda,n}$, формально з тангенціальним переміщенням дробинки.

За нашим спостереженням коефіцієнти z_n і z_τ при очищенні виробів з низьковуглецевих сталей сталевим колотим дробом є незмінними при оптимальних режимах процесу і практично рівними $z_n = z_\tau = z$. На основі чисельних експериментальних даних НДІ «Емальхіммаш» м. Полтава (Україна), встановлено значення цих коефіцієнтів близьким до 4,6.

Загальний коефіцієнт руйнування визначаємо так

$$k_p = z(k_{\lambda,n} + k_{\lambda,\tau}) = zk_\lambda. \quad (5)$$

На рис. 1 подано графіки залежностей коефіцієнтів руйнування від кута атаки (k_p – загальний; $k_{p,екс}$ – експериментальний загальний; $k_{ет}$ – втомного руйнування; $k_{мр}$ – внаслідок мікрорізання).

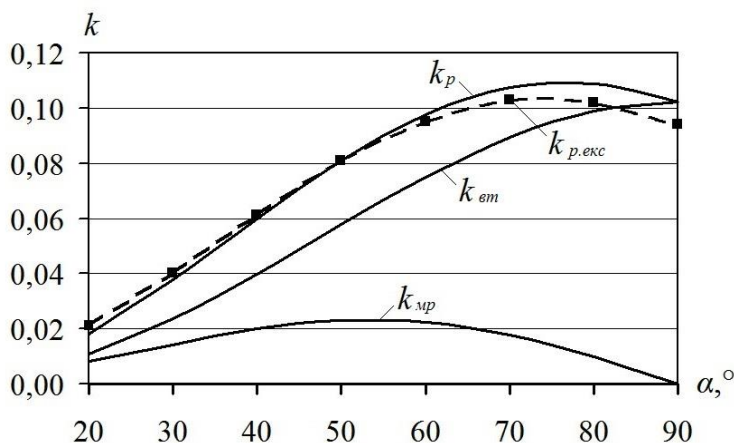


Рис. 1. Залежність коефіцієнта руйнування від кута атаки

Заводські дослідження впливу дробоструминного факела свідчать про практично пропорційне збільшення коефіцієнта руйнування із зростанням кута атаки. При $\alpha > 70^\circ$ інтенсивність зростання уповільнюється і навіть спадає (рис. 1 штрихова лінія). Останнє пояснюється наростаючим зменшенням при великих кутах кількості робочих атакуючих дробинок у факелі внаслідок їх зіткнення з дробинками, що рикошетують. Аналітично оцінити такий вплив важко, хоча й робити цього немає сенсу, оскільки раціональними кутами атаки при дробоструминні є кути $40^\circ < \alpha < 70^\circ$, коли впливом зіткнення дробинок можна нехтувати. Загальний коефіцієнт її руйнування набуває свого максимального значення при кутах атаки близьких до $60^\circ \dots 70^\circ$ (рис. 1), що підтверджується як [5], так [6].

Формула (5) дає задовільну збіжність теоретичних і заводських експериментальних даних (рис. 1). Розбіжність складає близько 10%.

Наведені дані дозволяють пов'язати міру руйнування поверхні металевих виробів при дробоструминному очищенні із вихідними характеристиками процесу і узгодити його наслідкові параметри: продуктивність, швидкість переміщення факела та економічний період стійкості дробу за відомими співвідношеннями. Ці показники безпосередньо пов'язані з аспектами руйнування оброблюваних металевих поверхонь і визначають ступінь ефективності й енергоємності процесу дробоструминної обробки виробів.

- [1]. Goryk O., Koval'chuk S., Brykun O., Aksonov S. Assessment of quality criteria of shot blasting cleaning of the inner surfaces of chemically resistant containers. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2023. P. 98–107. DOI: 10.1007/978-3-031-18487-1_10.
- [2]. Mayer P., Dmitruk A., Leja N., Pakiet E. Pull-off strength of fibre-reinforced composite polymer coatings on steel substrate. *Journal of Adhesion*. 2022. 98(3). P. 286–304. DOI: 10.1080/00218464.2020.1831478.
- [3]. Goryk A., Koval'chuk S., Brykun O., Chernyak R. Viscoelastic resistance of the surface layer of steel products to shock attack of a spherical pellet. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. P. 217–227. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.864.217.
- [4]. Горик О.В., Черняк Р.Є., Чернявський А.М., Брикун О.М. Дробоструминне очищення. Теорія і практика. Полтава : Видавництво ПП «Астрая», 2021. 326 с.
- [5]. Srinivas Reddy P., Ravi Kumar P., Prasad D. V. S. S. V., Saroja Rani B., Narayana Gupta C. H. L., Daniel Das A., Subbiah R. Effect of parameters and surface analysis on eglin steel by shot blasting method. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 72. P. 2833–2836. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.07.248.
- [6]. Wang S., Hao R., Liu H., Wang X., Yang Q. Fracture behavior of the hot rolled Strip's surface scale layer from different impacts angles. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 905. P. 67 – 72. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.905.67.

DESTRUCTION ASPECTS OF THE SURFACE LAYER OF METAL SURFACES DURING SHOT BLASTING

The aspects of the process of destruction of the surface layer of metal products during shot blasting are substantiated depending on the specified process parameters, which allows for more rational planning of energy-saving, environmentally friendly and balanced technology for high-quality preparation of product surfaces for subsequent application of stable non-metallic protective coatings. Experimental and theoretical patterns of the mechanism of cleaning (destruction) of metal product surfaces are established through the destruction coefficient associated with the crater coefficient, which characterizes the result of the dynamic interaction of the pellet with the metal half-space and integrates the initial parameters of the shot blasting technology: pellet diameter, angle and attack speed, and physical and mechanical properties of the product material.

УДК 539.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ПАЯНЕ З'ЄДНАННЯ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Делявський М.В., д.т.н., проф., Мікуліч С.Б., аспірант

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

Паяні з'єднання широко використовуються у багатьох інженерних конструкціях завдяки своїм численним перевагам. У сучасному виробництві вони використовуються як у металевих, так і неметалевих, наприклад пластикових, поліпропіленових та ін., деталях. У ділянці пайки наявна концентрація напружень, оцінка якої є важливою при визначенні надійності та термінів експлуатації відповідних деталей, особливо за динамічного чи вібраційного навантаження.

Тому важливе значення мають дослідження щодо вивчення розподілу напружень в околі таких концентраторів напружень, особливо за дії нестационарних навантажень. Розвиток аналітично-числових методів розв'язання зазначеного класу задач дозволить здійснювати ґрунтовний аналіз напруженого стану відповідних елементів конструкцій при вивченні їх механічної поведінки за дії різних типів динамічних впливів.

Пайкові з'єднання можна розглядати як жорсткі нерухомі включення у пластинчастих елементах. Розподіл напружень та деформацій у околі та на границі включення у таких елементах конструкцій істотно залежить від форми включення та його геометричних характеристик. Ґрунтовний аналіз напружено-деформованого стану геометрично-однорідних тіл дозволяє запропонувати підходи до зменшення інтенсивності напружень шляхом підбору оптимальних режимів навантаження.

Для побудови розв'язків задач про дослідження концентрації напружень біля включень за статичного та квазістатичного навантаження у нескінченних пластинках у літературі використовуються аналітичні [1], напівчислові [2] та числові [3] методи.

У роботі запропоновано використання аналітично-числової методики [4], що ґрунтується на застосуванні методу граничних елементів [5] до дослідження розподілу напружень на границі матриці та включення для випадку дії квазістатичного хвильового навантаження.

У роботі розглядався пластинчастий елемент, у який впаiano жорстке включення еліптичної форми (рис. 1). У центрі ваги включення розміщувалася декартова система координат $Ox_1x_2x_3$. Через L позначалася границя контуру включення, через D – область, яку займає пластинка. Граничні умови задачі записувалися у вигляді:

$$u_i|_L = 0, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

де u_1 та u_2 – відповідно переміщення точок границі пластинки в напрямку осей Ox_1 та Ox_2 .

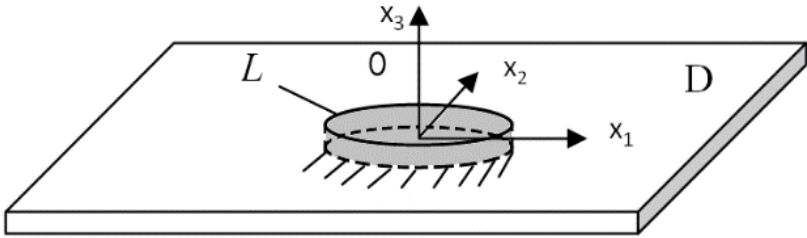


Рис.1. Модель задачі

Задача розв'язувалася за використання методу граничних елементів [5]. При цьому інтегральне представлення переміщень у випадку другої основної задачі записувалося у вигляді [4]:

$$u_i(x_1, x_2) = - \int_L u_j(x_1^0; x_2^0) \cdot P_{ji}^*(x_1; x_2; x_1^0; x_2^0) ds,$$

де P_{kj}^* — фундаментальні функції, що відповідають напруженню у k -му напрямку від дії одиничних сил у j -му напрямку. Для двовимірного випадку значення індексів приймаюлися відповідно рівними $k, j = 1, 2$.

Задовольняючи граничні умови (1) розв'язання задачі зведено до системи слабо сингулярних інтегральних рівнянь. Числовий аналіз проведено для випадку дії «падаючої» хвилі стиску, потенціали якої задавався у формі [1]:

$$\Phi = \Phi_0 e^{i\omega(\tau - \omega_1 x_1)}, \quad \Psi = 0.$$

де ω - частота, $\omega_1 = \frac{\omega}{c_1}$, $\Phi_0 = \frac{\rho}{\omega^2}$. Числові розрахунки виконані для випадку, коли хвиля поширювалася у напрямку осі Ox_1 .

Для числових розрахунків було використано квадратурні формули

підвищеної точності. Розрахунок напружень на границі включення та у його околі у пластинчастому елементі проводився на основі отриманих у роботі аналітичних залежностей, які були записані у інтегральній формі.

На основі розробленого у роботі підходу проведено числовий аналіз напруженого стану для випадку еліптичних включень з різним відношення півосей: розраховано максимальні кільцеві та радіальні напруження на границі включення та досліджено їх розподіл вздовж границі. Також запропонована методика дозволила дослідити зміну радіальних напружень у пластинчастому елементі в околі включення, що дало можливість сформулювати висновки щодо локалізації концентрації напружень.

- [1]. Guz, A.N., Kubenko, V.D. and Cherevko, M.A. Diffraction of Elastic Waves. Science Dumka, Kiev, 1978, 307 p.
- [2]. Katsikadelis J.T. The Boundary Element Method for Engineers and Scientists: Theory and Applications (Second Edition), Academic Press, 2016, 446 p.
- [3]. Nazarenko O., Usov A., Volkova M., Kozin O. Mathematical Modeling of the Stress-Strain State of a Plate with Rigid Linear Inclusion and Mixed Boundary Conditions. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, 1/2023 (138), PP. 22-28.
- [4]. Шваб'юк В.І., Фурс Т.В., Коменда Н.В., Мікуліч С.Б. Інтегральні рівняння задачі дифракції хвиль у пружних середовищах з включеннями за дії нестационарних навантажень. Наукові нотатки, 75, Луцьк, 2023, С. 95-99.
- [5]. Brebbia, C., Telles, J., Wrobel, L.: Boundary element techniques. Springer, New York, 1984.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF DYNAMIC LOAD ON A SOLDERED JOINT BASED ON THE BOUNDARY ELEMENT METHOD

In this work, based on boundary element method, a study of the dynamic stress state of infinite plates with rigid inclusions was carried out. Numerical calculations were performed for the case of elliptical inclusions with different half-suction ratios.

УДК: 621.8

СУЧАСНІ ВИДИ ІМПЛАНТІВ ДЛЯ ЛІКТЬОВОГО СУГЛОБА СОБАК: ОГЛЯД І ПЕРСПЕКТИВИ

Гільчук А.В.,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м. Київ, a.v.gilchuk@gmail.com

Динник А.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м. Київ, annadynnik79@gmail.com

Дослідження імплантатів для собак-пацієнтів висвітлює основні переваги та недоліки найпопулярніших продуктів, доступних на ринку. Оцінюючи відгуки про ці продукти, можна визначити напрямки для вдосконалення наявних конструкцій і дослідити різні концепції моделювання. На сьогодні існують дві основні системи імплантатів, що використовуються для інвазивного лікування дисплазії ліктьового суглоба у собак:

- BioMedtrix TATE Elbow System
- Система Canine Universal Elbow (CUE) від Arthrex

У наступних підрозділах буде розглянуто кожен з цих систем, зокрема їхні особливості.

Тотальна артропластика ліктьового суглоба (total arthroplasty of the elbow) – це метод лікування, розроблений доктором ветеринарної медицини Ренді Акером. Основними перевагами цього методу є легкість імплантації з мінімальною травмою для пацієнта, особливо порівняно з операцією повної заміни кульшового суглоба. Компанія BioMedtrix, провідний виробник ветеринарних ортопедичних імплантатів, спільно з доктором Акером розробила тотальний ендопротез ліктя TATE Elbow (Рис. 1). Ця система передбачає помірно інвазивне ендопротезування з фрезеруванням по осі центру обертання [6].

Імплант виготовлено з матеріалів, які відповідають міжнародним стандартам у ветеринарній медицині. Металеві компоненти виконано з титану або кобальт-хромових сплавів. Полімерні елементи характеризуються високою біосумісністю й амортизуючими властивостями, що знижує навантаження на суглоб під час руху [6]. Після досліджень BioMedtrix вирішила випускати імплантати та спеціальні інструменти й проводити курси підготовки хірургів для зменшення ймовірності хірургічних помилок [7].

Незважаючи на переваги, імплант BioMedtrix TATE має й недоліки. У 60% випадків спостерігалися ускладнення під час або після операції. З них 15% потребували додаткових медичних втручань у короткостроковий та середньостроковий періоди [6].

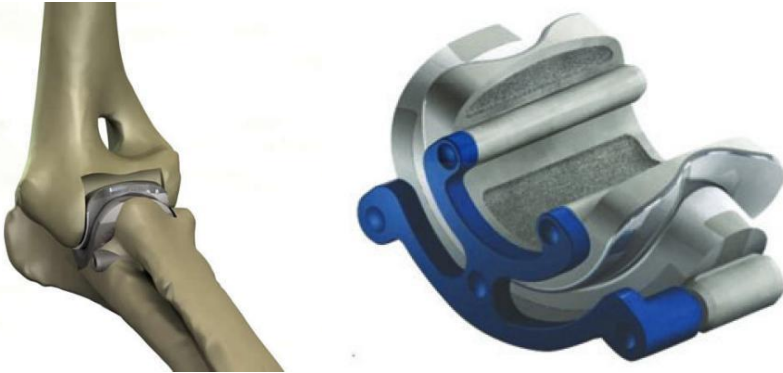


Рис. 1: Система ендопротезування BioMedtrix TATE [6].

Це свідчить про необхідність подальших досліджень та вдосконалення методик хірургічного втручання. Загалом, імплант BioMedtrix TATE значно покращує якість життя собак, однак власники мають бути обізнані про можливі ризики й ускладнення процедури.

Система CUE є одним з ефективних варіантів лікування дисплазії ліктьового суглоба собак. Ця процедура розроблялася протягом багатьох років і представляє новий підхід до складної проблеми. Основна мета системи CUE – лікування кінцевої стадії втрати хряща ліктя шляхом заміни пошкоджених ділянок із збереженням решти структури суглоба [8].

Перед процедурою всім пацієнтам проводять артроскопію для оцінки стану хряща. Потім виконується медіальна артротомія через пошкоджені ділянки, які замінюють спеціальними імплантатами. Існує одинарна пробка для вінцевої кістки та подвійна пробка для плечової кістки (Рис. 2). Імплантати забезпечують підтримку медіальної частини суглоба та дозволяють природний рух у всьому діапазоні [8].

Результати показують, що через 6 місяців або пізніше після операції повна функціональність спостерігається у 47,6% випадків, а прийнятна – у 43,7% [8, 9]. Це підтверджує ефективність CUE як методу лікування дисплазії. Однак спостерігалися випадки механічної несумісності імплантів та ерозії медіальної області, що потребує додаткових досліджень для вдосконалення конструкції та методик хірургічного

втручання [9]. Вік собак також є важливим фактором – старші пацієнти можуть мати гірші клінічні результати порівняно з молодшими [9].

Дослідження показали високий рівень ускладнень при використанні системи TATE, зокрема, 60% у періопераційний період, 15% у короткостроковий та 15% у середньостроковий періоди [6].



Рис. 2: Ілюстрація імплантів Canine Unicompartmental Elbow (CUE) System Arthroplasty System, встановлених у плечовій та ліктьовій кістках для лікування хвороби медіального відділу ліктьового суглоба собаки [8].

Незважаючи на це, кінцевий клінічний результат був сприятливим для більшості випадків, із суттєвим зменшенням болю, хоча мобільність не покращилася [6]. Важливим фактором для успішного функціонального результату TATE є точна реконструкція анатомічного центру обертання. Система показала здатність точно відновлювати центр обертання у 8 з 10 випадків у моделі *ex vivo* [10]. Однак техніка фрезерування може впливати на точність встановлення компонентів, що, у свою чергу, може призводити до погіршення остеointegraції [11].

У дослідженнях було виявлено, що CUE також супроводжується різними ускладненнями, а саме: у 21% випадків спостерігалися ускладнення, з яких 15% були серйозними, а 6%—незначними [9]. Інше дослідження повідомляє про 1% катастрофічних, 10,7% серйозних та 27,2% незначних ускладнень [8]. Це підкреслює важливість ретельного моніторингу після операції.

Через серйозні ускладнення, які виникають під час використання різних моделей тотального ендопротезування ліктьового суглоба у собак, однокомпонентний підхід є набагато кращою альтернативою та має

найбільший сенс. Відновлюючи лише пошкоджені ділянки й зберігаючи більшу частину суглоба, ризик серйозних ускладнень знижується. Однак повна заміна суглоба вважається золотим стандартом лікування на кінцевій стадії захворювань суглобів. Лікування лише сильно пошкоджених ділянок є обґрунтованим, оскільки збереження нормальних структур суглоба значно знижує ймовірність важких ускладнень і значною мірою допомагає в лікуванні наслідків операції. CUE передбачає мінімальне видалення кістки та є відносно простою процедурою порівняно з повною заміною суглоба, що знову ж таки знижує ймовірність значних ускладнень.

Обидві системи мають свої переваги та недоліки:

- BioMedtrix TATE демонструє високий рівень ускладнень, але забезпечує зменшення болю у пацієнтів.

- Canine Universal Elbow (CUE) Arthrex показує надійність при навантаженнях до руйнування, що може бути важливим фактором при виборі системи для ендопротезування ліктя у собак.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на вдосконалення процесу адаптації протезів до індивідуальних потреб пацієнтів.

1. Rohwedder, T. (2021). Biomechanics of the canine elbow joint. In *Updates on Veterinary Anatomy and Physiology*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99569>
2. Constantinescu, G. M., & Constantinescu, I. A. (2009). A clinically oriented comprehensive pictorial review of canine elbow anatomy. *Veterinary Surgery*, 38(2), 135–143.
3. Cook, C. R., & Cook, J. L. (2009). Diagnostic imaging of canine elbow dysplasia: A review. *Veterinary Surgery*, 38(2), 144–153.
4. Michelsen, J. (2013). Canine elbow dysplasia: Aetiopathogenesis and current treatment recommendations. *The Veterinary Journal*, 196(1), 12–19.
5. Bruecker, K. A., Benjamino, K., Vezzoni, A., Walls, C., Wendelburg, K. L., Follette, C. M., Déjardin, L. M., & Guillou, R. (2021). Canine elbow dysplasia: Medial compartment disease and osteoarthritis. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, 51(2), 475–515. <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2020.12.008>
6. De Sousa, R. J., Parsons, K. J., Owen, M. R., Grierson, J., McKee, W. M., Kulendra, E., & Burton, N. J. (2016). Radiographic, surgeon, and owner assessment of the BioMedtrix TATE elbow arthroplasty. *Veterinary Surgery*, 45(6), 726–735.
7. Acker, R. (2010, September 15–18). TATE elbow development [Conference presentation]. World Veterinary Orthopaedic Congress (WVOC), Bologna, Italy.
8. Cook, J., Schulz, K., Karnes, G., Franklin, S., Canapp, S., Lotsikas, P., Fitzpatrick, N., Wheeler, J., Stiffler, K., Gillick, M., Cross, A., Walls, C., Albrecht, M., Williams, N., Crouch, D., Lewis, D., Pozzi, A., & Ridge, P. (2015). Clinical outcomes associated with the initial use of the Canine Unicompartmental Elbow (CUE) Arthroplasty System®. *The Canadian Veterinary Journal*, 56(9), 971–977. <https://doi.org/10.5167/UZH-117839>
9. Bayer, K., Winkels, P., Andreoni, A., Schmierer, P., Rohwedder, T., others. (2019). Complications and short-to-midterm results in a case series of 52 CUE procedures using a modified caudo-medial approach. *Open Veterinary Journal*, 9(3), 205–215.

10. Burton, N., Ellis, J., Burton, K., Wallace, A., & Colborne, G. (2013). An ex vivo investigation of the effect of the TATE canine elbow arthroplasty system on kinematics of the elbow. *The Journal of Small Animal Practice*, 54(5), 240–247.
11. Gosling, M., Martínez-Taboada, F., Lintelo, G., & Burton, N. (2018). Evaluation of the milling technique on the component-bone interface in the TATE elbow. *Veterinary Surgery*, 48(1), 50–56. <https://doi.org/10.1111/vsu.13115>

MODERN TYPES OF CANINE ELBOW JOINT IMPLANTS: REVIEW AND PROSPECTS

This project reviews current implant types for canine elbow joint replacement. Elbow dysplasia involves developmental abnormalities that degrade cartilage and joint surfaces, leading to pain and limited mobility, often requiring surgical treatment. The literature review focuses on implant design, material selection, biomechanical performance, surgical techniques, and clinical outcomes. It highlights modern technologies, including biocompatible materials, and addresses key challenges such as wear resistance, fixation stability, and complication risks.

УДК 624.131.4

ПРОГНОЗНІ ОЦІНКИ ОСІДАННЯ ҐРУНТУ В ПІВДЕННИХ ТА ЦЕНТРАЛЬНИХ РЕГІОНАХ УКРАЇНИ

Дорошенко А.Г.

Центр досліджень Держспецтрансслужби, м. Дніпро, andorosh79@gmail.com

Чеханюк Б.Є., Примаченко В.Ф.

Центр досліджень Держспецтрансслужби

Вступ

Розвиток військової фортифікації як галузі науки про війсьні укріплення відбувалося і відбувається в тісному діалектичному взаємозв'язку і взаємозалежності з розвитком засобів і способів збройної боротьби. Високий рівень насичення театру бойових дій сучасними видами озброєння, такими як далекобійна артилерія, ударні дрони, високоточні ракети, авіація та засоби радіоелектронної боротьби, суттєво ускладнює завдання щодо підвищення живучості особового складу та військової техніки. У таких умовах якісне фортифікаційне обладнання стає основою для забезпечення живучості підрозділів, забезпечення стійкої оборони та ефективного використання доступних ресурсів. С початку збройної агресії росії проти України виникла

нагальна потреба модернізації існуючих фортифікаційних споруд та будівництва розгалуженої мережі таких споруд на другому оборонному рубежі так і в подальшому. Однак, без вогневого впливу на теперішній час зазнали руйнувань деякі фортифікаційні споруди споруджені після 2014 року під час ведення антитерористичної операції, зокрема взводні та ротні опорні пункти, призначені для укриття особового складу впродовж певного проміжку часу. В спорудах спостерігається утворення тріщин та зміна їх цілісності.

Одна з основних причин руйнування фортифікаційних споруд, це осадка ґрунтів під їх навантаженням. Осідання ґрунтів під тиском залізобетонних фортифікаційних споруд залежить від кількох факторів: виду ґрунту, властивостей фундаменту, характеристик навантаження, вологості ґрунту та інших параметрів. [1 - 5]. Для зменшення деформацій основ та їх впливу на будівлі і споруди при влаштуванні фундаментів передбачають ряд заходів, а саме: водозахисні заходи на ділянках складених ґрунтами, які є чутливими до зміни вологості; захист ґрунтів основи від хімічно-активної рідини, яка може привести до просадок, набухання; збереження природної структури і вологості ґрунтів, дотримання технології влаштування фундаментів; ущільнення ґрунтів; повна або часткова заміна ґрунтів подушками з піску, гравію чи щебню; введення в ґрунт спеціальних домішок (для ліквідації здимальних властивостей, просочення нафтопродуктами або засолення ґрунтів); армування ґрунту (введення спеціальних плівок, сіток); збільшення міцності і просторової жорсткості споруди, що досягається підсиленням конструкцій; збільшення піддатливості споруди за рахунок гнучких або розрізних конструкцій [2-4, 6, 7]. Але більша частина цих заходів не може бути застосована при фортифікаційному обладнанні територій під час війни.

Прогнозування осідання ґрунтів під тиском основних фортифікаційних споруд на основі загальних знань про фізико-механічні властивості ґрунтів регіонів в яких заплановано їх зведення дозволить в подальшому спланувати будівництво в сприятливих умовах, що збільшить тривалість можливого використання цих споруд. Отже, метою виконання даного дослідження було отримання типових показників осідання ґрунтів під тиском фортифікаційних споруд промислового виготовлення [8] (на прикладі окремих територій центральних та південних областей України)

Основна частина

Як відомо основою забезпечення стійкості і функціональної придатності будівель і споруд є здатність гірських порід чинити опір зовнішньому впливу тобто фізико-механічні властивості ґрунтів [2, 5, 6]. Фізико-механічні властивості великою мірою залежать від фізико-географічних умов їхнього формування, тобто повністю визначаються історією тектонічного розвитку

даного регіону, яка у свою чергу зумовлює геологічну будову та гідрогеологічні умови, рельєф і певною мірою клімат. Звідси випливає, що породи геологічна історія яких однакова, мають одні й ті ж показники складу і властивостей. Наприклад, леси, оолові піски тощо, які формувалися в сухих-холодних, чи сухих-спекотних умовах [3 - 5]. Один з чинників зміни фізико-механічних властивостей порід і зменшення їхньої несучої здатності це підтоплення, яке призводить до активізації небезпечних геологічних процесів (карсту, зсувів, суфозії), що призводить до непередбачуваних осідань споруд та їхнього руйнування, агресивності підземних вод, підвищення сейсмічності територій, погіршується якість ґрунтів, відбувається заболочування ділянок, забруднення поверхневих і підземних вод затоплення і погіршення санітарно- гігієнічних умов заглиблених інженерних споруд [3 - 5].

Розрахунок осідання ґрунту з урахуванням часу та фізико-механічних властивостей ґрунту в рамках теорії консолідації Терцагі визначали за формулою [1 - 7]:

$$S_t = S_{max} \cdot U(t), \quad (1)$$

де: S_t — осідання в момент часу t ; S_{max} — максимально можливе осідання; $U(t)$ — коефіцієнт консолідації в момент часу t , який залежить від часу та фізико-механічних властивостей ґрунту:

$$U(t) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi^2 C_v t}{H^2}\right), \quad (2)$$

де: C_v — коефіцієнт консолідації, $\text{м}^2/\text{рік}$; H — товщина стисливого шару ґрунту, м ; t — час, рік . Коефіцієнт консолідації характеризує швидкість ущільнення ґрунту під навантаженням. Його значення залежить від типу ґрунту, ступеня ущільненості, пористості, вологості, мінералогічного складу та інших факторів. Товщина стисливого шару ґрунту залежить від геологічної будови території, типу ґрунтів, рівня ґрунтових вод і умов забудови [1 - 7]. S_{max} — повне осідання ґрунту під дією зовнішнього навантаження, яке визначили за формулою:

$$S_{max} = \frac{qH}{E}, \quad (3)$$

де: E — модуль деформації ґрунту, МПа ; q — тиск на ґрунт, кПа . Модуль деформації ґрунту визначає здатність ґрунту протистояти деформаціям під навантаженням, його значення залежить від типу ґрунту, ступеня ущільненості, вологості та глибини залягання.

Прогнозні оцінки осідання ґрунту під тиском залізобетонних споруд взводного опорного пункту було здійснено для Запорізької Миколаївської Дніпропетровської та Херсонської областей України. В ході виконання дослідження в межах теорії консолідації Терцагі були розраховані загальне осідання ґрунту, та осідання за один, два та три роки. Для визначених регіонів України значення товщини стисливого шару ґрунту, коефіцієнта

консолідації та модуля деформації були визначені на основі загальних знань з геологічної будови території, типу ґрунтів та рівня ґрунтових вод.

Висновки

В ході проведеного дослідження на основі розрахунків було визначено, що осідання ґрунту для лесових суглинків, суглинків та глин складає від 1 до 53 мм за рік та до 100 мм за 3 роки, максимальне осідання для цих ґрунтів складає від 4 до 250 мм. При облаштуванні на цих типах ґрунтів слід звернути увагу на зволоження та рівень ґрунтових вод які призводять до суттєвого зниження механічних властивостей лесових ґрунтів, а саме, зменшуються допустимі навантаження від споруд та збільшується осідання. Тому слід ретельно слідкувати за вологісним режимом при експлуатації споруд збудованих на цих ґрунтах, використовувати вологовідводячу покрівлю та поліпшувати дренажні властивості ґрунту навколо споруд та т.і.. Згідно розрахованих даних найбільш придатними для зведення фортифікаційних споруд є піски (максимальне осідання не перевищує 8 мм) та щільні глини.

За результатами розрахунків осідання під тиском основних споруд взводного опорного пункту встановлено, що найбільше осідання ґрунту спостерігається під тиском вогневої споруди (ВС-1-3), яка має найбільше значення тиску на ґрунт. Тому в подальшому при облаштуванні фортифікаційних споруд для прогнозування осідання ґрунту з часом доцільно в першу чергу робити розрахунок для вогневої споруди (ВС-1-3).

Підрядним організаціям в ході будівництва фортифікаційних споруд другого оборонного рубежу та вглибині оборони, необхідно врахувати райони поширення ґрунтів із специфічними властивостями, зокрема лесів, набрякаючих, засолених, структурно нестійких, ґрунтів з високими просадними властивостями та врахувати речовинний (мінералогічний) склад ґрунтів, їхні структурно-текстурні особливості, які виступають в якості підґрунтя показників фізичних і механічних властивостей ґрунтів. Використані при розрахунках типові значення товщини стисливого шару (Н), коефіцієнта консолидації (C_v) та модуля деформації (Е) можуть значно відрізнятися в залежності від конкретних місцевих умов, тому підрядним організаціям для точного визначення параметрів ґрунтів на конкретній ділянці доцільно:

Урахувати можливу наявність ґрунтів із просадочними властивостями, особливо для лесових ґрунтів.

Ураховувати вплив зволоження та рівня ґрунтових вод.

Ураховувати вплив техногенних факторів.

- [1] Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти: підручник / М.Л. Зоценко та ін. Полтава: ПНТУ, 2003. 446 с.
- [2] Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник / Л.М. Шутенко, О.Г. Рудь, О.В. Кічаєва та ін.; за ред. Л.М. Шутенка. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. 563 с.
- [3] Волошин П., Кремінь Н. Гідрогеологічне та інженерно-геологічне моделювання і прогнозування: конспект лекцій. Львів: Львівський національний університет ім. Івана Франка, 2023. 446 с.
- [4] Зоценко М.Л., Винников Ю.Л. Основи гідрогеології та інженерної геології: навчальний посібник. Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. 258 с.
- [5] Кічаєва О.В. Будівництво у складних інженерно-геологічних умовах: конспект лекцій. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2020. 51 с.
- [6] Основи та фундаменти: навчальний посібник / І.О. Парфентьева, О.В. Верешко, Д.А. Гусарчук. Луцьк: ЛНТУ, 2017. 296 с.
- [7] Розрахунки несучої здатності і технологія закріплення основ будівель і споруд залізничного транспорту: навчальний посібник / А.М. Пługін, А.А. Пługін, Л.В. Трикоз та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2011. 150 с.
- [8] Споруди взводного опорного пункту. Архітектурно-будівельні рішення. Редакція 04/01. Робоча документація (робочі креслення). Альбом № 1. Київ: Державне підприємство Міністерства оборони України «Центральний проектний інститут», 2024. 111 с.

PREDICTIVE ASSESSMENT OF SOIL SETTLEMENT IN THE SOUTHERN AND CENTRAL REGIONS OF UKRAINE

This study presents predictive assessments of soil settlement under the load of industrially manufactured fortification structures, utilizing Terzaghi's consolidation theory. By analyzing the physical and mechanical properties of soils characteristic of various Ukrainian regions, the research aims to enhance the longevity and structural integrity of these fortifications. Based on the calculations, recommendations are proposed for construction contractors to optimize the deployment of fortification structures, considering the specific physical and geographical soil formation conditions in different regions of Ukraine.

УДК 539.9

ПК ЛІРА 10. РОЗРАХУНКОВІ МОЖЛИВОСТІ

Євзеров І.Д., д.т.н. , Група компаній ЛІРА, м. Київ

Програмний комплекс ЛІРА 10 призначений для розрахунку міцності та стійкості всіх видів будівельних конструкцій – цивільних та промислових будівель та споруд, об'єктів ядерної енергетики, мостів, гідротехнічних споруд тощо, на всі види статичних та динамічних навантажень.

Програмний комплекс заснований на методі скінчених елементів [1]. В ньому можна розраховувати плоскі та просторові ферми та рами, пластини, масивні тіла, комбіновані системи. Графічна система дозволяє ефективно та якісно генерувати модель та візуалізувати отримані розрахунковим процесором результати. Системи конструювання реалізують перевірку та підбір залізобетонних, сталевих та дерев'яних перерізів.

Викладено основні можливості розрахункового процесора, зокрема, визначення параметрів напружено-деформованого стану при статичному, температурному та динамічному навантаженні, визначення частот та форм власних коливань, геометрично нелінійний розрахунок мембран, стержнів та пластин, стійкість конструкцій, задачі із односторонніми в'язями (конструктивна нелінійність), поетапна зміна розрахункової схеми у процесі будівництва (монтаж), теплопровідність, фільтрація, задачі з елементами ґрунту. Серед унікальних конкурентних переваг є сьоме вузлове невідоме (базисні функції – задовольняють однорідному рівнянню рівноваги), змінний переріз, проміжні вузли у пластинах та об'ємних елементах, елементи інтерфейсу для ґрунтів, елементи невідбиваючої границі для динаміки та напівнескінченої області для статички, динаміка для фізичної та геометричної нелінійності, багатошарові пластини, врахування руйнування бетону на розтяг та розриву арматури, коректне підсумовування для кратних форм, неузгоджені сітки, геометричні характеристики перерізу на кручення та зсув, в'язке демпфування, елементи рідини, розрахунок на дію вибухової хвилі.

[1] Ciarlet P. (1978) The finite element method for elliptic problems. North-Holland, Amsterdam.

SP LIRA 10. CALCULATION CAPABILITIES

The LIRA 10 software package is designed to calculate the strength and stability of all types of building structures - civil and industrial buildings and structures, nuclear power facilities, bridges, hydraulic structures, etc., for all types of static and dynamic loads. The main capabilities of the computational processor are outlined.

УДК 539.3

ВАРІАНТ МАТЕМАТИЧНОЇ ТЕОРІЇ БАГАТОШАРОВИХ НЕЛІНІЙНИХ ПРУЖНИХ ПЛАСТИН НЕСИМЕТРИЧНИХ СТРУКТУР ДОВІЛЬНОЇ ПОСТІЙНОЇ ТОВЩИНИ

Зеленський А. Г., д. ф.-м. н., проф., Слободянюк С. О., д.т.н., проф.

Український державний університет науки і технологій
ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»,
м. Дніпро, Україна

a.zelensky@ukr.net, slobodianiuk.sergey@gmail.com

Побудовано варіант математичної теорії деформування багатошарових нелінійно-пружних (за Каудерером) пластин довільної постійної товщини з несиметричною структурою за товщиною. Поперечне навантаження на горизонтальних гранях може бути довільним статичним. Компоненти напружено-деформованого стану (НДС) та граничні умови на бічній поверхні є функціями трьох просторових координат. Просторові граничні задачі для багатошарових пластин зведені до двовимірних за допомогою тривимірних рівнянь теорії пружності, варіаційного принципу Рейснера та розкладу компонент НДС у нескінченні математичні ряди за комбінаціями поліномів Лежандра в межах кожного шару. Виведено основні залежності, граничні умови та системи диференціальних рівнянь рівноваги з частинними похідними високого порядку відносно компонент переміщень. Розроблено метод розв'язання граничних задач у даній постановці. Всі залежності та рівняння містять нелінійні члени. Методологія побудови варіанта нелінійної теорії дозволяє точно задовольняти граничні умови на горизонтальних гранях пластини та на бічній поверхні, а також точно задовольняти умови жорсткого спраження суміжних шарів. Система рівнянь рівноваги має високий порядок. Цей підхід суттєво відрізняється від підходів інших авторів [1, 2]. Оляди робіт цього напрямку виконано, зокрема в [3–6].

Система диференціальних рівнянь рівноваги багатошарових нелінійно пружних пластин довільної сталюї товщини несиметричної будови в наближенні К0-3. має 22-й порядок відносно 22-х складових компонент переміщень і має такий вигляд:

$$\begin{aligned} D_{m,1}u_0 + D_{m,2}v_0 + D_{m,3}u_1 + D_{m,4}v_1 + D_{m,5}u_2 + D_{m,6}v_2 + D_{m,7}u_3 + D_{m,8}v_3 + \\ + D_{m,9}w_1 + D_{m,10}w_2 + D_{m,11}w_3 = D_{mp}p + D_{mq}q + D_{m\zeta}, \quad (m = 1, 2, \dots, 11), \end{aligned} \quad (1)$$

де D_{ij} – диференціальні оператори не вище 2-го порядку; D_{mp}, D_{mq} – диференціальні оператори не вище 1-го порядку; $D_{m\xi}(x, y, t)$ – нелінійні функції, які залежать від НДС. Усі оператори і функції залежать від механіко-геометричних параметрів пластини.

Запропоновано та розроблено аналітичний метод розв'язання систем (1).. Метод базується на алгебраїчних, диференціальних та операторних перетвореннях вихідних систем. Вони зводяться до двох зручних визначальних систем.

Одна система (6-го порядку) описує вихровий крайовий ефект з уточненням НДС:

$$H_{i1}\psi_1 + H_{i2}\psi_2 + H_{i3}\psi_3 = \psi_{i\xi}(x, y, t) \quad (i = 1, 2, 3), \quad (2)$$

де $\psi_i(x, y) = \partial u_i / \partial y - \partial v_i / \partial x$ – вихрові функції; H з індексами – диференціальні оператори не вище 2-го порядку, праві частини нелінійні.

Інша система (16-го порядку) – описує уточнений внутрішній НДС з потенціальним крайовим ефектом:

$$D_0 D_0 D_0 D_0 D_1 D_2 D_3 D_4 \Phi_i(x, y) = f_i(x, y); \quad (i = 1, 2, \dots, 5), \quad (3)$$

де $D_0 = \nabla^2$, $D_i = (\nabla^2 - s_i)$, $s_i - \text{const}$.

Обидві системи (2) і (3) у свою чергу зведені до диференціальних рівнянь 2-го порядку, що суттєво зменшує математичні складнощі їх розв'язання.

- [1] Прусаков А. П. К теории изгиба слоистых пластин. Прикл. механика. 1997 (33). С. 64–70.
- [2] Пискунов В.Г., Рассказов А.О. Развитие теории слоистых пластин и оболочек. Прикл. механика. 2002, 38(2). С. 22–57.
- [3] Григоренко Я. М., Василенко А. Т., Панкратова Н. Д. Статика анизотропных толстостенных оболочек. К.: Вища шк., 1985. 190 с.
- [4] Неміш Ю. М., Хома І. Ю., Напружено-деформований стан нетонких оболонок і пластин, Узагальнена теорія (огляд), Прикладна механіка. 1993, 29(11), С.3–32.
- [5] Гузь А.Н., Неміш Ю.Н. Методы возмущений в пространственных задачах теории упругости. К.: Вища шк., 1982. 352 с.
- [6] Зеленський А. Г. Варіант математичної теорії ортотропних і фізично нелінійних нетонких пластин. Монографія. Дніпро: ПДАБА, 2023. 171 с.

VARIANT OF THE MATHEMATICAL THEORY OF MULTILAYER NONLINEAR ELASTIC PLATES OF NON-SYMMETRIC STRUCTURES OF ARBITRARY CONSTANT THICKNESS

A variant of the mathematical theory of deformation of multilayer nonlinearly elastic (according to Kauderer) plates of arbitrary constant thickness with non-symmetric structure in thickness has been constructed. The transverse load on the horizontal faces can be arbitrary static. The components of the stress-strain state (SSS) and the boundary conditions on the lateral surface are functions of three spatial coordinates. Spatial boundary value problems for multilayer plates are reduced to two-dimensional using three-dimensional equations of the theory of elasticity, the Reissner variational principle, and the expansion of the components of the SSS into infinite mathematical series by combinations of Legendre polynomials within each layer. This approach differs significantly from the approaches of other authors. The main dependencies, boundary conditions and systems of equilibrium differential equations with high-order partial derivatives with respect to the displacement components are derived. All dependencies and equations contain nonlinear terms. The new methodology for constructing a variant of the nonlinear theory makes it possible to accurately satisfy the boundary conditions on the horizontal faces of the plate and on the lateral surface, and to accurately satisfy the conditions of rigid conjugation of adjacent layers. The system of equilibrium equations has a high order. An analytical method for solving these systems is proposed and developed. The method is based on algebraic, differential and operator transformations of the initial systems. They are reduced to two convenient defining systems: one describes the vortex edge effect with a refinement of the SSS, and the other describes a refined internal SSS with a potential edge effect. The order of the systems of differential equations does not depend on the number of layers, but depends only on the number of retained terms in the mathematical series. The internal SSS is separated from the potential edge effect. By the method of order reduction, the determining systems are reduced to second-order differential equations. This significantly simplifies the solution of boundary value problems. General solutions for all components of the SSS were found through general solutions of second-order differential equations. For plates with non-symmetric structure, the equations of skew-symmetric and symmetric deformation are interconnected, unlike plates with a symmetric structure.

УДК 624.012.25:625.07

КОМБІНОВАНЕ АРМУВАННЯ, ЯК МОЖЛИВІСТЬ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

**Поліщук О.М., аспірант, Зятюк Ю.Ю., к.т.н., доц., Фурсович М.О.,
к.т.н., доц., Супрунюк В.В., к.т.н., доц., Романюк В.В., к.т.н., доц.**
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

Збільшення міцності бетону на стиск спричиняє зростання його крихкості та погіршення деформативних властивостей. Такі бетони характеризуються практично миттєвим руйнуванням при навантаженнях як короткочасних так й тривалих, при досягненні в ньому граничних напружень [1-3]. Одним із дієвих способів вирішення даного недоліку є введення до складу цементної матриці дисперсного армування фіброю, що дозволяє суттєво підвищити його міцність особливо на розтяг і згин, тріщиностійкість, стійкість до ударних і вібраційних впливів тощо [2, 4-5].

На експлуатаційні характеристики і довговічність бетонів впливають відповідні фізико-механічні показники, такі як: міцність на розтяг при згині, міцність на стиск, марка за морозостійкістю, марка за стиранистю, деформативність. Слід відмітити, що деформативність бетонів тісно пов'язаний з його тріщиностійкістю, для характеристики якої запропоновані різні критерії, однією з найбільш простих є відношення границі міцності при розтягу або згині до величини міцністю при стиску ($f_{c,t}/f_{cm}$) [2, 6]. Це відношення збільшується по мірі підвищення однорідності мікро- та макроструктури бетону і зменшення кількості різних дефектів, що сприяють концентрації напружень.

У дослідженнях була використана стальна хвилеподібна фібра (StF); нормативна міцність на розрив складала 1350 МПа; розміри довжина - $60,0 \pm 5,0$ мм; товщина $1,0 \pm 0,1$ мм, ширина хвилі $6,0 \pm 0,1$ мм (EN 14889-1:2006). А також поліпропіленова фібра (PF); довжиною - 25 мм, діаметром 0,069 мм, з межею міцності на розрив 650-750 МПа.

Основні дослідження були проведені з застосування математичного планування експериментів [7], що дозволило алгоритмізувати виконання дослідів за схемою, яка є оптимальною з точки зору як обсягу експериментальних робіт так і статистичних вимог.

Для цього був реалізований трирівневий двохфакторний план B_2 [9], Змінними факторами було обрано: вміст поліпропіленової фібри, (PF), кг/м^3 , ($X_1 = 2 \pm 1 \text{ кг/м}^3$), вміст сталеної фібри, (StF), кг/м^3 ($X_2 = 80 \pm 40 \text{ кг/м}^3$). У ході

досліджень для оцінки впливу фібри на властивості бетонних сумішей та бетонів виготовляли стандартні зразки-куби ($10 \times 10 \times 10$ см) та призми ($10 \times 10 \times 40$ см), що тверділи у нормальних умовах. Визначали рухомість, міцність при стиску 4-ох зразків-кубів у віці 28 діб, міцність розтяг при згині 3-ох зразків-призм у віці 28 діб.

Вибір вмісту фібри був обґрунтований з огляду на їх оптимальну кількість згідно попередніх досліджень та огляду літературних джерел [2, 3, 8-11]. Рухомість сумішей в усіх точках плану була постійною та становила 12...15 см по осадці стандартного конуса Абрамса, для цього кількість води підбирали для кожного дослід. Після обробки і статистичного аналізу отриманих експериментальних даних були побудовані експериментально-статистичні моделі міцності на стиск та розтяг при згині дорожніх фібробетонів, які наведені нижче.

Експериментально-статистична модель міцність при стиску

$$f_{c,m}^{28} = 82.3 + 188 \cdot x_1 + 2,98 \cdot x_2 - 0.24 \cdot x_1 x_2 + 1.69 \cdot x_1^2 + 0.49 x_2^2 \quad (1)$$

Експериментально-статистична модель міцність при згині

$$f_{c,m}^{28} = 17.38 + 1.33 \cdot x_1 + 2,02 \cdot x_2 - 0.18 \cdot x_1 x_2 - 0.71 \cdot x_1^2 - 1.26 x_2^2 \quad (2)$$

Аналіз побудованих моделей (1, 2) дозволяє зробити висновки, що збільшення вмісту сталеві фібри в варіюваних межах при постійному водов'язкому відношенні збільшує міцність на 12...16 % при цьому ефект є більш значний при мінімальній кількості поліпропіленового волокна. В свою чергу вплив ППФ за умови витрати до $1,5 \text{ кг/м}^3$ не призводить до зростання міцності. Подальше збільшення вмісту поліпропіленові фібри до 3 кг/м^3 дає незначний приріст міцності до 10%. Як і у випадку з сталеві фіброю він є більш вагомим при мінімальній витраті іншого виду волокна та витраті в'язучого.

Вплив дисперсного армування на міцність на розтяг при згині є дещо іншим та має більш вагомий вплив. Збільшення вмісту сталеві фібри з 40 кг/м^3 до 120 кг/м^3 , а поліпропіленові до 3 кг/м^3 призводить до зростання міцності у віці 7 діб з 8,2...10,5 МПа до 13,1...15,2 МПа, залежно від варіювання факторів в межах плану.

Також прослідковується вплив взаємодії факторів. Слід відмітити, що позитивний вплив збільшення вмісту фібри обох типів поступово затухає при наближенні вмісту до максимуму в межах варіювання. Що дає змогу стверджувати про так звану зону оптимуму, що знаходиться в межах 80...100 кг та 2...3 кг для сталеві і поліпропіленові волокна відповідно. За таких умов міцність на згин досягає 15...17 МПа при мінімальній витраті в'язучого та 17...20 МПа при максимальній витраті.

Отримані результати вказують на те, що збільшення вмісту фібри у всьому діапазоні варіювання призводить до збільшення міцності при згині та

має екстремальний характер. Це свідчить про певні оптимальні витрати сталльної фібри (80...100 кг) в композиції з поліпропіленовим волокном (1,5...2 кг), які б забезпечували досягнення максимальної міцності на розтяг при згині 18...21 МПа.

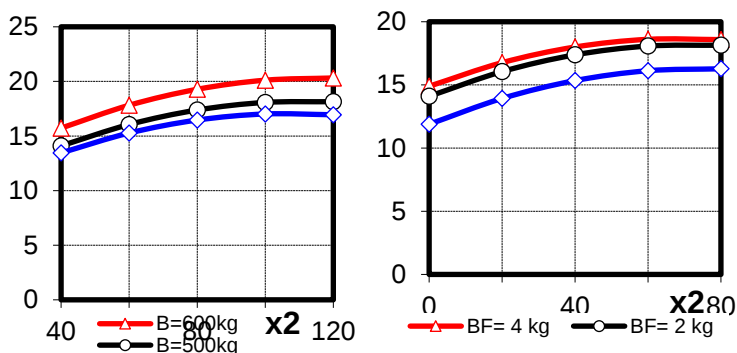


Fig. 1. Графічні залежності міцності на розтяг при згині (а) та стиску (б) фібробетонів

Підвищення міцності пояснюється підвищенням стійкості до розвитку та поширення мікротріщин, що присутні у бетонній матриці завдяки наявності волокон.

Таким чином в результаті експериментальних досліджень було встановлено можливість отримання фібробетону з використанням сталльної та поліпропіленової фібри, що характеризується міцністю при стиску понад 80 МПа, та розтягу при згині понад 17 МПа. Комбіноване армування бетону збільшує міцність бетону, причому більшою мірою збільшується міцність на розтяг при згині. Важливо відмітити, що деформативність бетонів тісно пов'язана з його тріщиностійкістю. Даний критерій зростає для бетонів із дисперсним комплексним армуванням, що підтверджується отриманими даними. Для досліджених фібробетонів збільшення $f_{c,tn}/f_{cm}$ з 0,17 до 0,23 та з 0,24 до 0,31 спричинене збільшенням вмісту фібри, як поліпропіленової так і сталєвої. Однак ця тенденція спостерігається при оптимальному вмісті фібри.

Висновки. Введення фібри, в першу чергу поліпропіленової, спричиняє зменшення пластичності бетону, що пояснюється більшою площею поверхні, яка потребує більшої кількості цементного тіста, а також збільшенням тертя між волокнами та бетоном під час змішування.

На основі аналізу комплексу експериментально-статистичних моделей міцнісних параметрів фібробетонів з використанням сталєвої та поліпропіленової фібри встановлено ефективність їх застосування для важких бетонів дорожнього одягу. Отримані кількісні залежності, що характеризують вплив вмісту сталєвої та поліпропіленової фібри на міцність при стиску та розтягу при згині. Міцність у віці 28 діб отриманих

фібробетонів знаходяться в межах, характерних для високоміцних бетонів і складає 83...98 МПа при стиску та 15...21 МПа на згин при розтягу.

Показано, що застосування дрібнозернистого бетону на досліджуваних видах фібри дозволяє підвищити коефіцієнт ефективності дисперсного армування (співвідношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску з 0,15...0,2 до 0,23...0,31).

- [1]. Guerini, V.; Conforti, A.; Plizzari, G.; Kawashima, S. Influence of Steel and Macro-Synthetic Fibers on Concrete Properties. *Fibers* 2018, 6, 47. [CrossRef]
- [2]. Dvorkin L., Konkol J., Marchuk V., Huts A. Efficient, Fine-Grained Fly Ash Concrete Based on Metal and Basalt Fibers. *Materials*, 2023, 16(11), 3969.
- [3]. Khan, I.U.; Gul, A.; Khan, K.; Akbar, S.; Irfanullah. Mechanical Properties of Steel-Fiber-Reinforced Concrete. *Eng. Proc.* 2022, 22, 6. <https://doi.org/10.3390/engproc202202006>
- [4]. Amin, M.N.; Ahmad, W.; Khan, K.; Ahmad, A. Steel Fiber-Reinforced Concrete: A Systematic Review of the Research Progress and Knowledge Mapping. *Materials* 2022, 15, 6155. <https://doi.org/10.3390/ma15176155>
- [5]. Leonid Dvorkin, Oleh Bordiuzhenko, Vadim Zhitkovsky, Vitaliy Marchuk. Mathematical modeling of steel fiber reinforced concrete properties and selecting its effective composition. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 708, Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings 20–22 November 2019, Kharkiv, Ukraine. (Scopus, Author ID: 57214703951).
- [6]. Солодкий С. Й., Толмачов С. М. Бетонні дорожні та аеродромні покриття : навч. пос. Львів : НУЛП, 2016. 132 с.
- [7]. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Multi-Parametric Concrete Compositions Design. Nova Science Publishers, New York, 2013. – 223 p
- [8]. Lau, C.K.; Chegenizadeh, A.; Htut, T.N.S.; Nikraz, H. Performance of the Steel Fibre Reinforced Rigid Concrete Pavement in Fatigue. *Buildings* 2020, 10, 186. [CrossRef]
- [9]. Mishutin A., Iskov V. Concrete for road paving using fibre and recycled aggregates. Conferința Internațională “Probleme actuale în urbanism și, arhitectură”, ed. XII-a, 2024, 195-202.
- [10]. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskiy V., Hedulian D. Strength, frost resistance, and resistance to acid attacks on fiber-reinforced concrete for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fibers. *Materials*, 2022, 15(23), 8339. <https://doi.org/10.3390/ma15238339>.
- [11]. Kroviakov S. O., Hedulian D. Іu., Kryzhanovskiy V. O., Zavoloka M. V., Yelkin A. V. Comparison of fiber concrete properties for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fiber. Bulletin of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2022, №87. С.76-84. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-87-76-84>.

COMBINED REINFORCEMENT AS A MEANS OF INCREASING THE DURABILITY OF RIGID PAVEMENT STRUCTURES

The article presents the results of a study on the physical and mechanical properties of rigid pavement concrete based on combined reinforcement using steel and polypropylene fibers. The main experiments were conducted using mathematical experiment planning, which allowed for the algorithmization of the testing process both in terms of experimental workload and compliance with statistical requirements. Quantitative dependencies were obtained that characterize the influence of the content of steel and polypropylene fibers on the compressive strength and flexural tensile strength of fiber-reinforced concrete. It was shown that the use of fibers improves the efficiency coefficient of dispersed reinforcement (i.e., the ratio of flexural tensile strength to compressive strength).

UDC 697.9

ANALYTICAL METHOD OF CALCULATING THE CHANGE IN CARBON DIOXIDE CONCENTRATION DURING THE INTERACTION OF A HUMAN MODEL AND A SUPPLY AND EXHAUST VENTILATION SYSTEM

Isaiev V.F.

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Isaevv5@gmail.com

The space under consideration is an isolated room with two human models simulating breathing with the release of a given amount of air, which contains a certain mass of carbon dioxide. The space is ventilated. A certain concentration of CO₂ is present in the supply (atmospheric) air. The exhaust ventilation system removes the resulting air mixture, reducing the concentration of carbon dioxide in the space under study. The developed calculation methodology is valid for different types of air exchange in the room. This publication considers the air exchange scheme "air supply from above" - "air removal from above" [1].

A large group of rooms of different purposes are united by the type of harmful substances polluting the air in them (carbon dioxide, heat, water vapour). In particular, the concentration of CO₂ is regulated by normative documents of Ukraine [2, 3].

Examples of successful application of different methods and approaches in solving applied ventilation problems are given in [4-7].

As the analysis of publications shows, the development of new analytical methods for calculating the stabilization of microclimate in rooms when using general exchange ventilation systems is an urgent task.

The aim of this paper is to develop a new analytical method to calculate a complex interaction system (human - supply and exhaust ventilation) for changes in carbon dioxide concentration.

In order to verify the calculation results obtained by the author's method, the results obtained using the ANSYS software [4-7] are used.

The object of research is an isolated space equipped with a supply and exhaust ventilation system. The room provides for the presence of a human model simulating his breathing.

Fig. 1 shows the calculation scheme of the investigated space

Initial data:

- Room dimensions 2 м x 2 м x 3 м;
- Inflow = 120 м³/hour = 2 м³/min (350 ppm);
- Air exhaust 120 м³/hour=2 м³/min;
- Initial CO₂ concentration in the room is 2100 ppm;
- Breathing parameters:
- Expiratory volume 0.5 l = 0.0005 м³ (40000 ppm);

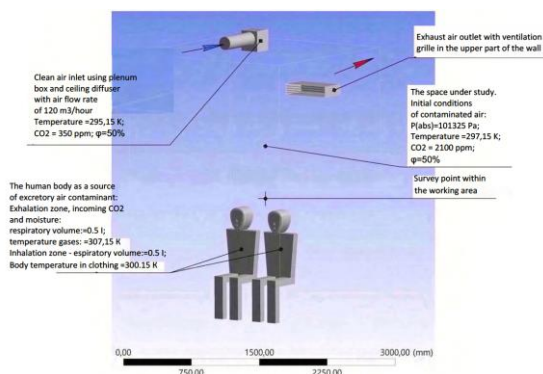


Fig. 1 Calculation scheme of the investigated space

The material balance equation based on the law of conservation of mass is used to describe the change of CO₂ concentration in the room:

$$\frac{dM}{dt} = \text{Tributary CO}_2 - \text{Decline CO}_2 + \text{Source CO}_2 \text{ from people,}$$

где M – mass of CO_2 in the room, (grams).

Convert the equation in terms of concentration C (ppm):

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q}{V} (C_{\text{supply}} - C) + \frac{G_{\text{CO}_2} \cdot N}{V \cdot \rho_{\text{air}}},$$

where

- $Q=2\text{ м}^3/\text{min}$ – ventilation flow rate;
- $V=12\text{ м}^3$ room volume;
- $C_{\text{supply}} = 350\text{ ppm}$
- $C_{\text{CO}_2} = 0.0708\text{ gr/cycle}$ CO_2 mass per respiration cycle
- $N = 2$ – number of people
- $\rho_{\text{air}} = 1.164\text{ кг/м}^3$ - air density

Let us reduce to a linear differential equation of the first order:

$$\frac{dC}{dt} + \frac{Q}{V}C = \frac{Q}{V}C_{\text{supply}} + \frac{G_{\text{CO}_2} \cdot N}{V \cdot \rho_{\text{air}}}, \quad (1)$$

Let us denote the constants:

- $k = \frac{Q}{V} = \frac{6}{12} = 0.1667\text{ min}^{-1}$
- $S = \frac{Q}{V}C_{\text{supply}} + \frac{G_{\text{CO}_2} \cdot N}{V \cdot \rho_{\text{air}}} = 0.1667 \cdot 350 + \frac{2 \cdot 0.0708}{12 \cdot 1.164} = 58.34\text{ ppm/min}$

The equation will take the form:

$$\frac{dC}{dt} + 0.1667C = 58.34 \quad (2)$$

Solution of the differential equation

We use the method of integrating module. General solution:

$$C(t) = e^{-kt} \left(\int S \cdot e^{kt} dt + C_0 \right) \quad (3)$$

where C_0 – integration constant.

Solving the integral:

$$\int S \cdot e^{kt} dt = \frac{S}{k} \cdot e^{kt} \quad (4)$$

Substituting:

$$C(t) = e^{-kt} \left(\frac{S}{k} \cdot e^{kt} + C_0 \right) = \frac{S}{k} + C_0 e^{-kt} \quad (5)$$

Definition of constant C_0

Let us use the initial condition $C_0 = 2100 \text{ ppm}$

$$2100 = \frac{S}{k} + C_0 \rightarrow C_0 = 2100 - \frac{58.34}{0.1667} \approx 2100 - 350 = 1750$$

Final expression

$$C_0 = 350 + 1750 \cdot e^{-0.1667t} \quad (6)$$

Determination of carbon dioxide concentration via $t=1 \text{ min}$.

$$C(1) = 350 + 1750 \cdot e^{-0.1667} \approx 350 + 1750 \cdot 0.846 \approx 1859 \text{ ppm}$$

The method of calculation of CO_2 concentration change was proposed, it showed good convergence of results in comparison with the mathematical model. The use of the methodology allows predicting the possibility of reducing the concentration of carbon dioxide in rooms equipped with supply and exhaust ventilation units. Comparison of the results obtained by calculation and mathematical modelling allows us to recommend the proposed engineering methodology for practical calculations (Fig. 2).

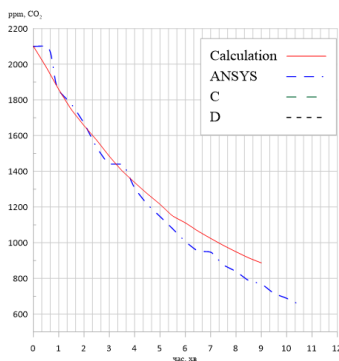


Fig. 2 Dynamics of changes in CO_2 concentration over time of observation

1. V. Kiosak, V. Isaiev, V. Fedorenko, A. Gridasov Modeling the entry of air contaminants into a room Механіка та математичні методи/ Mechanics and mathematical methods VI/2/2024 / Page 58-76 ОДАБА.
<https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-58-76>
2. DBN V.2.5-67:2013. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia. Effective from 2014-01-01. Official edition. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2013. 135 p. [in Ukraine].
3. DSTU B EN 15251:2011. Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen dlia proektuvannia ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel po vidnoshenniu do yakosti povitria, teplovoho komfortu, osviltennia ta akustyky (en 15251:2007, idt). Effective from 2013-01-01. Official edition. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2012. 71 p. [in Ukraine].
4. Farzad P., Lian-Ping W., Weiwei D., Yong-Feng M., Challenges in simulating and modeling the airborne virus transmission: A state-of-the-art review. Phys. Fluids 33, 101302 (2021); doi: 10.1063/5.0061469. [in Ukraine].
5. Mansour E., Vishinkin R. Measurement of temperature and relative humidity in exhaled breath. Sensors and actuators B: chemical. 2020. Volume 304. 127371. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925400519315709>.
6. Elcner J. Study of airflow in the trachea of idealized model of human tracheobronchial airways during breathing cycle. EPJ web of conferences 92, 02016 (2015) : Experimental Fluid Mechanics 2014, 6 May 2015. P. 6. URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159202016>.
7. Ansys CFX-Solver Theory Guide. Release: 2021 R2. 2nd ed. Canonsburg : ANSYS, Inc., 2021. 387 p.

АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЗМІНИ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ПІД ЧАС ВЗАЄМОДІЇ МОДЕЛІ ЛЮДИНИ ТА СИСТЕМИ ПРИПЛИВНО-ВИТЯЖНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ

Простір, що розглядається, являє собою ізольовану кімнату з двома людськими моделями, що імітують дихання з виділенням заданої кількості повітря, яке містить певну масу вуглекислого газу. Простір вентильовується. У припливному (атмосферному) повітрі присутня певна концентрація CO₂. Система витяжної вентиляції видаляє отриману повітряну суміш, зменшуючи концентрацію вуглекислого газу в досліджуваному просторі. Розроблена методика розрахунку справедлива для різних типів повітрообміну в приміщенні. У цій публікації розглядається схема повітрообміну "приплив повітря зверху" - "видалення повітря зверху" [1].

УДК 624.04

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗРАХУНКОВИХ СХЕМ: ЦИЛІНДРИЧНИЙ КОЛОДЯЗЬ І ПРИЗМАТИЧНА БАЛКА НА ПРУЖНІЙ ОСНОВІ

Сур'янінов М.Г., Кіріченко Д.О., Сур'янінов В.М.

Одеська державна академія архітектури та будівництва, м. Одеса

На сьогоднішній день у багатьох інженерних спорудах використовуються елементи кільцевої форми перерізу. Яскравими прикладами є напірні та безнапірні труби, опори ЛЕП, водонапірні вежі і т.і.. Особливе місце у ряді конструкцій даної форми займають циліндричні колодязі. Їх проектування та розрахунок приймається відповідною нормативною документацією [1,2].

Досліджувані колодязі із залізобетону та дисперсного залізобетону (рис. 1) на суцільній пружній основі відображаються через модель замкнутої кругової циліндричної оболонки постійної товщини, яка навантажена за всією поверхнею розподіленим нормальним тиском (рис. 2). Вона підкріплюється між поперечними діафрагмами рівновіддаленими однаковими кільцевими ребрами, що мають однакову площу поперечного перерізу.

Відстеження розрахункової схеми циліндричного колодязя є певною аналогією із схемою вигину призматичної балки, що лежить на суцільній пружній основі та є можливістю для наступного застосування чисельно-аналітичного методу граничних елементів.



Рис. 1. Вигляд опускового колодязя

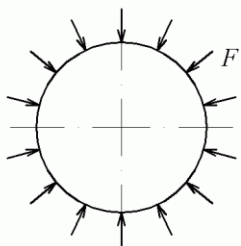


Рис. 2. Розрахункова схема кругової циліндричної оболонки

Через симетрію навантаження за віссю оболонки, деформація останньої буде також симетричною, через те вигин такої оболонки буде представлений, як вигин балки-смуги одиничної ширини, виділеної з оболонки, що розглядається, двома меридіональними площинами. (рис. 3).

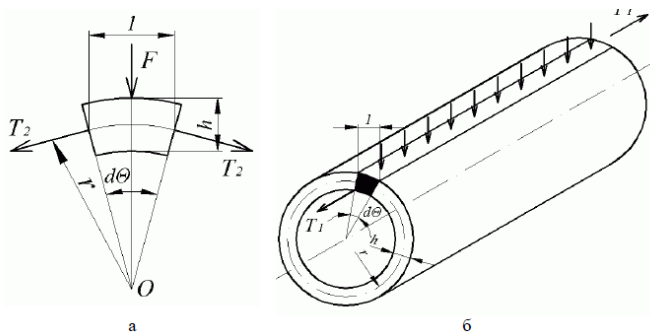


Рис. 3. Прикладання навантаження за смугою одиничної ширини

На балку-смугу діють:

- 1) рівномірно-розподілене за її довжиною поперечне навантаження F ;
- 2) зусилля T_2 , яке прикладається до бічних граней балки-смуги. Дані зусилля спрямовані до поперечного перерізу кола оболонки та характеризують вплив відсіченої частини;
- 3) повздовжні зусилля T_1 , зумовлені дією нормального тиску на торці оболонки.

Замкнена циліндрична оболонка є обмеженою по кінцях поперечними діафрагмами. При сприйнятті великих зовнішніх поперечних навантажень при великій відстані між діафрагмами — така оболонка може втратити стійкість навіть за дуже незначної величини зовнішнього тиску [3,4]. Було

прийнято рішення для посилення оболонки — підкріпити кільцевими замкнутими ребрами жорсткості із однаковим кроком. Крайні ребра жорсткості ставляться рівних відстанях друг від друга (рис. 4).

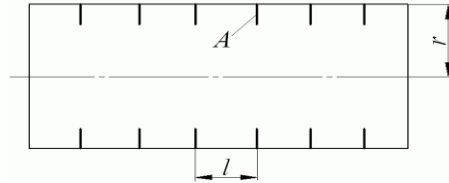


Рис. 4. Розташування на оболонці кільцевих ребер жорсткості

Нехтуючи впливом жорсткості торцевих діафрагм на роботу в середині прогону оболонки, радіальні обтискання оболонки на відповідній відстані від діафрагм будуть абсолютно симетричними щодо площини підкріплюючих її ребер. Спираючись на це, можна обмежитися розглядом вигину оболонки лише в межах одного прогону [5,6].

Остаточні формули для визначення характерних елементів вигину балки-смуги, записуються в наступному вигляді:

$$w(0) = \frac{pr^2}{Eh} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) \left[1 - \frac{\phi_1(u)}{1 + B_1} \right], \quad (1)$$

де $w(0)$ — прогин кругової циліндричної оболонки в перерізі посередині між ребрами;

p — інтенсивність поперечного навантаження кругової циліндричної оболонки;

r — радіус оболонки;

E — жорсткість;

h — товщина стінки кругової циліндричної оболонки;

μ — коефіцієнт Пуассона;

$$M_1(0) = -\frac{pl^2}{Eh} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) \frac{\chi_1(u)}{1 + B_1}, \quad (2)$$

де $M_1(0)$ — згинальний момент у перерізі посередині прольоту;

l — крок ребер жорсткості.

$$M_1\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{pl^2}{12} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) \frac{\chi_2(u)}{1 + B_1}, \quad (3)$$

де $M_1(0)$ — згинальний момент в опорних перерізах.

$$w\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{pr^2}{Eh} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right) \frac{B_1}{1 + B_1}, \quad (4)$$

де $w\left(\frac{l}{2}\right)$ — прогин кругової циліндричної оболонки в середньому перерізі.

Тут $B_1 = \frac{lh}{E} \mu_1(u)$, а $\phi_1(u)$, $\chi_1(u)$, $\chi_2(u)$, $\mu_1(u)$ — табульовані функції.

Опускний колодязь представляє замкнуту кругову циліндричну оболонку постійної товщини, що навантажена за всією поверхнею розподіленим нормальним тиском. Конструктивні рішення таких елементів та діючі експлуатаційні навантаження дуже різноманітні, що зумовлює різноманітність методів їх розрахунку. В свою чергу це потребує необхідність удосконалення існуючих та розробку нових методів розрахунку. Яскравим прикладом є чисельно-аналітичний метод граничних елементів.

[1]. ДСТУ Б В. 2.6-106:2010 Конструкції бетонні і залізобетонні для колодязів каналізаційних, водопровідних і газопровідних мереж. К.: Мінрегіонбуд України. 2011. 24 с.

[2]. EN 1992-1-4: Eurocode 2: Design of concrete structures. {in English}

[3]. Dick, C.P., Korkolis, Y.P. (2014). Mechanics and full-field deformation study of the Ring Hoop Tension Test. International Journal of Solids and Structures, 51(18), 3042–3057. doi:10.1016/j.ijsolstr.2014.04.023.

[4]. Нечипоренко, В. Дослідження міцності пружної циліндричної конструкції під дією локального навантаження. Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. 2017. С.76-82.

[5]. Burdette, E. G., Barker, R. M. Elasticity and Plasticity: The Mathematical Theory of Elasticity and Plasticity. Springer, 2003. 534 p.

[6]. Ugral, A. C. Stresses in Beams, Plates, and Shells. 3rd ed. New York: CRC Press, 2010. 684 p.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATION SCHEMES: CYLINDRICAL WELL AND PRISMATIC BEAM ON AN ELASTIC BASE

The manhole is a closed circular cylindrical shell of constant thickness, which is loaded over the entire surface with a uniform normal load. The design solutions of such elements and the operating operational loads are very diverse, which determines the diversity of methods for their calculation. In turn, this requires the need to improve existing and develop fundamentally new calculation methods. A striking example is the numerical-analytical method of boundary elements.

УДК 621.647.2

ТОЧНИЙ АНАЛІТИЧНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ПРУЖНОГО ЗГИНУ БАГАТОШАРОВОЇ КРУГОВОЇ АРКИ ПІД ДІЄЮ НОРМАЛЬНОГО РІВНОМІРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

**Ковальчук С. Б., д. т. н., проф., Горик О. В., д. т. н., проф.
Яхін С. В., к. т. н., доц., Брикун О. М., к. т. н., доц.**
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава

Кругові арки є достатньо поширеними елементами будівельних і машинобудівних конструкцій. Заміна однорідного матеріалу такого елемента багатошаровою структурою, за умови правильного підбору матеріалів шарів, їх черговості та товщини, може забезпечити необхідний рівень його міцності одночасно зі зниженням ваги, матеріалоемності, чи вмісту дорогих матеріалів. Однак, недостатній рівень розвитку аналітичної теорії згину композитних багатошарових кругових арок є додатковою перешкодою на шляху їх ефективного проектування та практичного застосування.

Врахування анізотропії та неперервної неоднорідності будови матеріалу кругового бруса із навантаженням на торцях було започатковане роботами С. Лехніцького [1], а врахуванням багатошарової структури – роботою [2], де G. Tolf побудував дискретну модель чистого згину багатошарового бруса з ізотропними шарами.

Ранні роботи для бруса із рівномірно розподіленим навантаженням невідомі, а серед сучасних робіт за даною тематикою можна виділити роботу [3], у якій запропоновано пошаровий розв'язок для ділянки багатошарового кругового бруса із ортотропними неперервно-неоднорідними шарами, що перебуває під дією нормального рівномірно розподіленого навантаження на зовнішній поздовжній поверхні та довільних навантажень у крайніх перерізах. Однак застосований у цій роботі для побудови розв'язку дискретний пошаровий підхід та недостатньо розроблене питання моделювання способів закріплення кінців арки ускладнює його практичне застосування. Метою даної роботи є отримання аналітичного розв'язку подібної до [3] задачі для кругової арки, але у випадку навантаження обох циліндричних поверхонь та дослідження методів моделювання основних типів закріплення кінців арки.

Нами у роботі [4] із використанням континуального підходу отримано точний аналітичний розв'язок задачі згину багатошарового кругового бруса з ортотропними шарами довільним навантаженням та торцях, а у роботі [5] – з рівномірним нормальним навантаженням на поздовжніх поверхнях. У роботах [6] та [7] із використанням принципу суперпозиції побудовано розв'язки для задач згину композитної багатошарової балки із різними способами закріплення торців під дією нормального навантаження розподіленого рівномірно та за законом трапеції. У зазначених розв'язках співвідношення для напружень та переміщень залежать від 6-ти невідомих початкових параметрів, що дозволяють узгоджувати деформації сусідніх ділянок бруса, а також моделювати різні способи закріплення його кінців.

Використовуючи подібний підхід на основі розв'язків [4] та [5] може бути побудований розв'язок задачі згину багат шарової кругової арки із рівномірно розподіленим нормальним навантаженням. Для розробки узагальненого підходу до визначення НДС багат шарових арок із різними способами закріплення кінців, спочатку було побудовано загальний розв'язок задачі для ділянки багат шарової кругової арки, що складається з m шарів однакової ширини b , виготовлених з різних матеріалів (рис. 1). Вважалося, що поперечний переріз арки має незмінну будову по довжині ділянки, його розміри відповідають умові $b \ll h$, а між шарами бруса виконуються умови абсолютно жорсткого з'єднання.

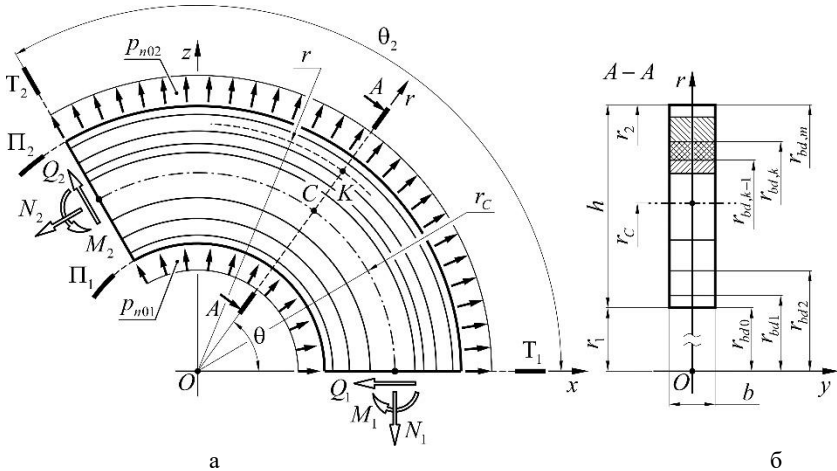


Рис. 1. Схема ділянки арки: (а) вид збоку; (б) поперечний переріз

Вважали, що ділянка арки знаходиться під дією рівномірно розподілених нормальних навантажень $p_{n0,\zeta}$ ($\zeta=1, 2$) на поздовжніх циліндричних поверхнях Π_ζ . У початковому T_1 ($\theta=0$) та кінцевому T_2 ($\theta=\theta_2$) перерізах ділянки арки діють внутрішні зусилля (навантаження), що зведені до рівнодійних поздовжньої, поперечної сил та згинаючого моменту: $N_\zeta, Q_\zeta, M_\zeta$.

Розподіл пружних характеристик $\mu_a^S = \mu_a^S(r)$ неоднорідного матеріалу ділянки, моделювався з використанням функції Хевісайда $H(r)$:

$$\mu_a^S = \sum_{k=1}^m \left\{ S_a^{[k]} \left[H(r - r_{bd,k-1}) - H(r - r_{bd,k}) \right] \right\}, \quad (1)$$

де $\|S_a^{[k]}\| = \|E_r^{[k]}, E_\theta^{[k]}, G_{r\theta}^{[k]}, \nu_{r\theta}^{[k]}, \nu_{\theta r}^{[k]}\|$; $r_{bd0} = r_1$, $r_{bd,m} = r_2$ – радіуси кривизни поздовжніх поверхонь Π_ζ (рис. 1, б).

Поєднанням виразів для компонент НДС розв'язків [4] та [5] отримані співвідношення для напружень та переміщень для поставленої задачі. Наприклад співвідношення для напружень:

$$\begin{aligned}\tau_{r\theta} &= -\frac{p_{n0}^\Sigma}{B_0^\tau} \varphi_{r\theta}^\tau \sin \theta + \frac{N_1}{bB_0^\tau} \varphi_{r\theta}^\tau \sin \theta + \frac{Q_1}{bB_0^\tau} \varphi_{r\theta}^\tau \cos \theta, \\ \sigma_r &= -\frac{p_{n0}^\Sigma}{B_0^\tau} \varphi_{r\theta}^\tau \cos \theta + \frac{m_{n0}^\Sigma}{B_{10}^\tau} \varphi_{r0}^\sigma + \frac{N_1}{bB_0^\tau} \left(\varphi_{r\theta}^\tau \cos \theta - \frac{r_c B_0^\tau}{B_1^\sigma} \varphi_r^\sigma \right) - \frac{Q_1}{bB_0^\tau} \varphi_{r\theta}^\tau \sin \theta - \frac{M_1}{bB_1^\sigma} \varphi_r^\sigma, \\ \sigma_\theta &= -\frac{p_{n0}^\Sigma}{B_0^\tau} \frac{1}{r} \frac{d(r^2 \varphi_{r\theta}^\tau)}{dr} \cos \theta + \frac{m_{n0}^\Sigma}{B_{10}^\tau} \frac{d(r \varphi_{r0}^\sigma)}{dr} - \frac{Q_1}{bB_0^\tau} \frac{1}{r} \frac{d(r^2 \varphi_{r\theta}^\tau)}{dr} \sin \theta + \\ &\quad + \frac{N_1}{bB_0^\tau} \left(\frac{1}{r} \frac{d(r^2 \varphi_{r\theta}^\tau)}{dr} \cos \theta - \frac{r_c B_0^\tau}{B_1^\sigma} \frac{d(r \varphi_r^\sigma)}{dr} \right) - \frac{M_1}{bB_1^\sigma} \frac{d(r \varphi_r^\sigma)}{dr}.\end{aligned}\quad (2)$$

У співвідношеннях (2) використовуються позначення для сталей:

$$\begin{aligned}p_{n0}^\Sigma &= \sum_{i=1}^2 \{r_i p_{n0,i}\}, \quad m_{n0}^\Sigma = \sum_{i=1}^2 \{r_i^2 p_{n0,i}\}, \\ B_0^\tau &= \int_{r_1}^{r_2} \varphi_{r\theta}^\tau dr, \quad B_1^\sigma = \int_{r_1}^{r_2} (r \varphi_r^\sigma) dr, \quad B_{10}^\sigma = \int_{r_1}^{r_2} (r \varphi_{r0}^\sigma) dr.\end{aligned}\quad (3)$$

Функції $\varphi_{r\theta}^\tau, \varphi_r^\sigma, \varphi_{r0}^\sigma$ є розв'язками лінійних диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}\alpha_2 r^2 \frac{d^2 \varphi_{r\theta}^\tau}{dr^2} + \alpha_1 r \frac{d \varphi_{r\theta}^\tau}{dr} + \alpha_0^\tau \varphi_{r\theta}^\tau &= \frac{1}{r}, \quad \varphi_{r\theta}^\tau|_{r=r_1} = 0, \quad \varphi_{r\theta}^\tau|_{r=r_2} = 0, \\ \alpha_2 r^2 \frac{d^2 \varphi_r^\sigma}{dr^2} + \alpha_1 r \frac{d \varphi_r^\sigma}{dr} + \alpha_0^\sigma \varphi_r^\sigma &= 1, \quad \varphi_r^\sigma|_{r=r_1} = 0, \quad \varphi_r^\sigma|_{r=r_2} = 0, \\ \alpha_2 r^2 \frac{d^2 \varphi_{r0}^\sigma}{dr^2} + \alpha_1 r \frac{d \varphi_{r0}^\sigma}{dr} + \alpha_0^\sigma \varphi_{r0}^\sigma &= 1, \quad \varphi_{r0}^\sigma|_{r=r_1} = -\frac{B_{10}^\sigma p_{n01}}{m_{n0}^\Sigma}, \quad \varphi_{r0}^\sigma|_{r=r_2} = \frac{B_{10}^\sigma p_{n02}}{m_{n0}^\Sigma},\end{aligned}\quad (4)$$

де $\alpha_2, \alpha_1, \alpha_0^\tau, \alpha_0^\sigma$ – змінні коефіцієнти:

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= \frac{1}{\mu_\theta^E}, \quad \alpha_1 = \frac{3}{\mu_\theta^E} + r \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{\mu_\theta^E} \right), \\ \alpha_0^\tau &= \frac{2\mu_{\theta r}^\nu}{\mu_\theta^E} - \frac{1}{\mu_r^E} - \frac{1}{\mu_{r\theta}^E} + r \frac{d}{dr} \left(\frac{2-\mu_{\theta r}^\nu}{\mu_\theta^E} \right), \quad \alpha_0^\sigma = \frac{1}{\mu_\theta^E} - \frac{1}{\mu_r^E} + r \frac{d}{dr} \left(\frac{1-\mu_{\theta r}^\nu}{\mu_\theta^E} \right).\end{aligned}\quad (5)$$

Отриманий розв'язок містить три статичні (N_1, Q_1, M_1) і три кінематичні ($u_{r11}, u_{\theta11}, u_{\theta12}$) початкові параметри, які можуть бути задані, як вихідні дані, або

можуть виступати в якості невідомих сталих, що визначаються за допомогою статичних і кінематичних умов. У загальному випадку 6 початкових параметрів дозволяють задати 6 незалежних переміщень 4-х довільних точок деформованої арки, які повністю визначають її положення в площині згину. Це дозволило розробити способи моделювання різних типів закріплення кінців багатошарових арок.

Побудований розв'язок може бути безпосередньо використаний для визначення НДС багатошарових арок. Також на основі отриманих співвідношень може бути побудований узагальнений метод визначення НДС багатопрогонових багатошарових арок та плоских багатошарових рам з довільною кількістю ділянок різної структури із зосередженими та рівномірно розподіленими навантаженнями різної інтенсивності.

- [1]. Lekhnitskii S. G. Anisotropic plate. Gordon and Breach, New York, 1968.
- [2]. Tolf G. Stresses in a Curved Laminated Beam. *Fibre Sci. Technol.* 1983. 19(4). P. 243–267.
- [3]. Wang M., Liu Y. Elasticity Solutions for Orthotropic Functionally Graded Curved Beams. *Eur. J. Mech. A/Solids*. 2013. 37. P. 8–16.
- [4]. Koval'chuk S. B., Goryk A. V. Elasticity Theory Solution of the Problem on Bending of a Narrow Multilayer Cantilever with a Circular Axis by Loads at its End. *Mech. Compos. Mater.* 2018. 54(5). P. 605–620.
- [5]. Koval'chuk S. B. Analytical Solution to the Plane Bending Task of the Multilayer Beam with a Circular Axis under Normal Uniform Loading. *Strength Mater.* 2020. 52(5). P. 762–778.
- [6]. Koval'chuk S., Goryk A. Exact Solution of the Problem of Elastic Bending of a Multilayer Beam under the Action of a Normal Uniform Load. *Mater. Sci. Forum*. 2019. 968. P. 475–485.
- [7]. Koval'chuk S., Goryk O., Yakhin S., Antonets A. Exact Analytical Solution of the Problem of Elastic Bending of a Multilayer Beam with a Normal Trapezoidal Load. *Key Eng. Mater.* 2024. 1005. P. 107–119.

EXACT ANALYTICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF ELASTIC BENDING OF A MULTILAYER CIRCULAR ARCH UNDER THE ACTION OF A NORMAL UNIFORM LOAD

An exact analytical solution to the problem of plane transverse bending of a section of a narrow multilayer circular arch under the action of a normal uniformly distributed load on the longitudinal faces is presented. The solution is constructed using the superposition principle on the basis of the authors' general solutions to the problems of bending of multilayer cantilevers with a circular axis under the action of loads on the free end and a uniformly distributed normal load on the longitudinal faces. Methods for modeling different types of end fixing for multilayer arches are considered: rigid, hinged, and combined. The influence of transverse shear deformations on the magnitude of deflection and normal stresses is analyzed using the example of a 5-layer arch with hinged fixed end fixing. The obtained relations allow determining the stress-strain state of multilayer arches with an arbitrary number of homogeneous (orthotropic, isotropic) and functionally gradient layers, taking into account transverse shear and compression deformations.

УДК 539.3

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ ТРИВИМІРНИХ ШАРУВАТИХ В'ЯЗКОЕЛЕКТРОПРУЖНИХ КОНІЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З ЗАЛЕЖНИМИ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПРИ МЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Козлов В.І., д.ф.-м.н., Лелюх Ю.І., к.ф.-м.н, Зінчук Л.П., к.ф.-м.н.
Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, м. Київ

Досить часто основним режимом роботи елементів конструкцій, що містять в'язкопружні п'єзоелектричні включення, є режим інтенсивних гармонічних електромеханічних навантажень з частотами, близькими до резонансних. Це обумовлює їх інтенсивний дисипативний розігрів та призводить до необхідності враховувати залежність електромеханічних властивостей від температури та таких типових для нелінійних систем явищ, як нелінійний гістерезис – залежність амплітуди коливань і температури від частоти.

На основі концепції комплексних характеристик [1] досліджено термоелектромеханічну поведінку тривимірної шаруватої конічної панелі з електров'язкопружних матеріалів при вимушених коливаннях. Залежність фізико-електромеханічних властивостей матеріалів шарів від температури враховувалась відповідно до роботи [2]. Розв'язок задачі про вимушені коливання та дисипативний розігрів з врахуванням нелінійної зв'язаності знаходився у процесі ітераційних наближень методом скінченних елементів у варіаційній постановці. На першій ітерації для даного моменту часу по заданому початковому розподілу температур знаходимо електромеханічні польові величини з розв'язку варіаційного рівняння електров'язкопружності

$$\delta\P = 0, \quad \Pi = \frac{1}{2} \int_V (c_{ijkl}^E \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} - 2e_{ijk} \varepsilon_{ij} E_k - \mu_{kl}^S E_k E_l - \rho \omega^2 u_k u_k) dV - \\ - \int_{\Sigma_p} (p_{nk} u_k - \sigma^e \varphi) d\Sigma_p. \quad (1)$$

Тут використано позначення $c_{kl ij}^E$, e_{klm} , μ_{km}^S , σ_{ij} , ε_{ij} – компонент тензорів пружних та п'єзоелектричних модулів, діелектричної проникності, напружень та деформацій відповідно; компонент вектора переміщень u_k та вектора напруженості електростатичного поля E_k ($\vec{E} = -\nabla \varphi$),

електричного потенціалу φ , густини ρ , кругової частоти ω , а також заданих компонент вектора поверхневих сил p_{nk} і густини електричного заряду σ^e .

Використовуючи розв'язок варіаційного рівняння (1), визначаються поля деформацій, напружень, напруженості електричного поля та електричного зміщення відповідно до комплексних рівнянь стану

$$\sigma_{kl} = c_{klj}^E \varepsilon_{ij} - e_{klm} E_m; \quad D_k = e_{klm} \varepsilon_{lm} + \mu_{km}^S E_m \quad (2)$$

та обчислюється значення дисипативної функції

$$D_M = \frac{\omega}{2} (\sigma_{ij}'' \varepsilon_{ij}' - \sigma_{ij}' \varepsilon_{ij}'' + D_i' E_i'' - D_i'' E_i'). \quad (3)$$

Одним та двома штрихами в (3) позначені відповідно дійсна і уявна частини відповідної комплексної величини.

Потім визначається температурне поле з розв'язку варіаційного рівняння нестационарної теплопровідності з відомим джерелом тепла у припущенні, що похідна за часом температурного поля не варіюється [2]

$$\begin{aligned} \delta I = 0, \quad I = \frac{1}{2} \int_V \left(\lambda_{ij} T_{,i} T_{,j} + 2\rho c \frac{\partial T}{\partial t} T - 2D_M T \right) dV + \\ + \frac{1}{2} \int_S \alpha_T (T - 2T_c) T dS, \end{aligned} \quad (4)$$

де T – осереднена за період коливань температура, λ_{ij} – коефіцієнти матриці теплопровідності; α_T – коефіцієнт теплообміну; c – коефіцієнт питомої масової теплоємності матеріалу. Початковий розподіл температурного поля вважається заданим: $T = T_0$ при $t = t_0$. По визначеному температурному полю уточнюються значення електромеханічних коефіцієнтів для наступної ітерації. Ітераційний процес продовжується до виконання умови збіжності. Потім відбувається наступний крок по часу.

Для апробації розробленого алгоритму розрахунку було проведено чисельне моделювання термоелектромеханічної поведінки тришарової кінечної панелі з центральним кутом 60° , меншим радіусом $0,1$ м, кутом при вершині конуса 90° , утвореної обертанням прямокутника довжиною $0,1$ м та товщиною $0,01$ м навколо осі z , яка шарнірно закріплена по контуру. Приповерхневі шари панелі виготовлено із товщиною поляризованої п'єзокераміки PZT (EC-65), які мають товщину $0,0025$ м, середній пасивний шар представлений алюмінієм. Панель навантажено внутрішнім тиском з

амплітудою $P_0 = 1,5 \cdot 10^4$ Па, при цьому на електродах і внутрішньому металевому шарі задавався нульовий потенціал.

На рис.1 представлено ізоповерхні розподілу температури у конічній тришаровій панелі на першій резонансній частоті $\omega_1 = 0,19391 \cdot 10^5$ рад/с для випадку, коли електромеханічні властивості матеріалу не залежать від температури.

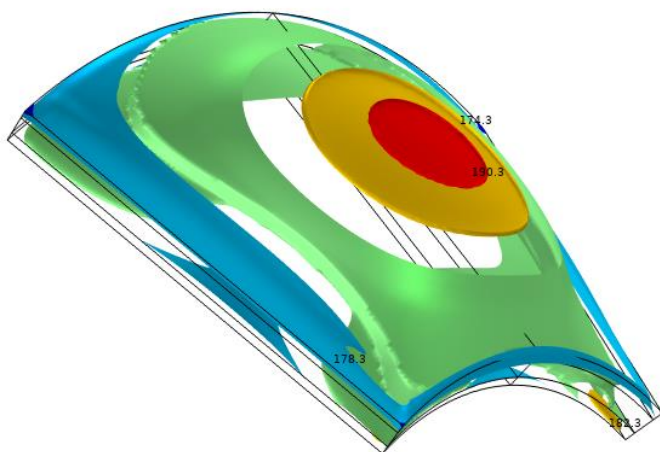


Рис.1

На рис. 2, 3 представлено температурно-частотну характеристику максимальної температури дисипативного розігріву та амплітудно-частотну характеристику максимального модуля комплексного товщинного зміщення конічної панелі ($\tilde{\omega} = \omega \cdot 10^{-5}$ рад/с, $w_0 = 10^{-5}$ м). Криві 1 відповідають випадку, коли електромеханічні властивості матеріалів не залежать від температури, криві 2 – випадку поліноміальної залежності електромеханічних властивостей п'єзоактивного матеріалу від температури [2].

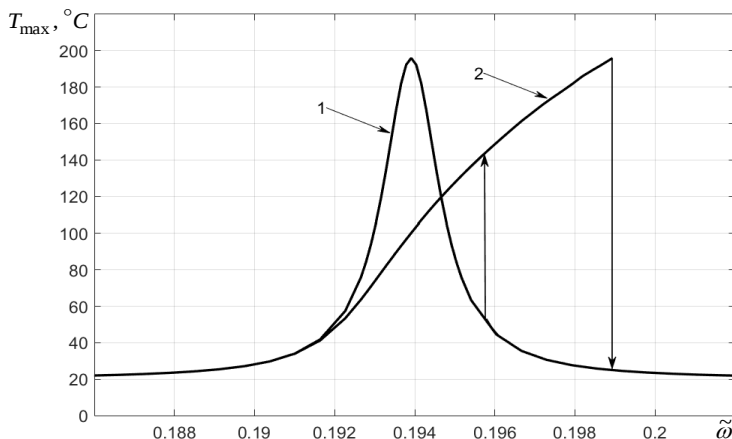


Рис.2

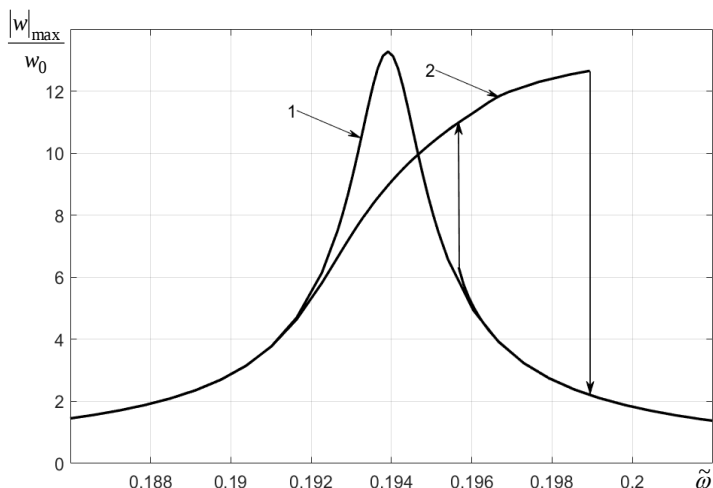


Рис.3

З аналізу представлених результатів випливає, що врахування залежності електромеханічних властивостей від температури призводить до типового для нелінійних систем характеру поведінки – нелінійного гістерезису, коли термомеханічні частотні характеристики демонструють залежності амплітуди коливань і температури від частоти.

[1]. Карнаухов В.Г., Михайленко В.В. Нелинейные одночастотные колебания и диссипативный разогрев неупругих пьезоэлектрических тел. – Житомир: ЖГТУ, 2005. – 428с.

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

NUMERICAL SIMULATION OF RESONANT VIBRATIONS OF THREE-DIMENSIONAL LAYERED VISCOELECTROELASTIC CONICAL PANELS WITH TEMPERATURE-DEPENDENT PROPERTIES UNDER MECHANICAL LOADING

The thermoelectromechanical behaviour of a three-layer conical panel made of inelastic piezoelectric materials under monoharmonical mechanical loading has been numerically investigated. It has been established that taking into account the dependence of the electromechanical properties of the material on temperature leads to a behaviour typical of nonlinear systems, namely the dependence of the amplitude of vibrations and the temperature of dissipative heating on frequency, herewith the thermomechanical frequency characteristics demonstrate the nature of nonlinear hysteresis.

УДК 624.012

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ВИПРОБУВАНИХ ПЛИТАХ З ЗАЛІЗОБЕТОНУ ТА СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ

**Сур'янінов М.Г., д.т.н., проф., Неутов С.П., к.т.н., доц.,
Корнесьва І.Б., к.т.н., доц.,**

Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 65029, Україна,
sng@odaba.edu.ua

Плита, як конструктивний елемент, є важливою складовою будівель та споруд. Серед безлічі факторів, що визначають ефективність і довговічність тієї чи іншої конструкції, важливу роль відіграють несуча здатність, деформативність та тріщиностійкість. Відомо, що введення в бетон сталевих фібр забезпечує значне підвищення його міцності, збільшує опір термічній дії та стирання, дозволяє підвищити в'язкість руйнування.

Вплив типу фібри та довжини волокна на тріщиностійкість, міцність та пористу структуру бетонної плити досліджено авторами роботи [1].

Зазначено, що бетон, посилений фіброю, демонструє найкращі характеристики. У роботі [2] авторами запропоновано методику розрахунку несучої здатності згинальних елементів із звичайною та попередньо-напруженою арматурою, а також зі сталевими фібрами. Алгоритм розрахунку заснований на деформаційному методі. Наведено результати розрахунку несучої здатності залізобетонної плити ПАГ–14 та аналогічної зі сталевої фібри. Порівняльний аналіз розрахунків показав ефективність використання сталевої фібри. У цьому напрямку працюють і багато інших авторів [3-5], але, кількісні значення підвищення характеристик завдяки використанню сталевої фібри доволі сильно різняться і це залежить від багатьох чинників: призначення та розмірів плити, схеми завантаження, виду фібри, тощо. Таким чином, дослідження згинальних конструкцій, а саме плит перекриття та дорожніх плит зі сталефібробетону, продовжує залишатися актуальним.

Лабораторні випробування проводилися командою дослідників кафедр Будівельної механіки та Опору матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Для дослідження були виготовлені моделі плит та повнорозмірні конструкції відповідно до норм [6-9]. Спочатку експериментальні випробування проводили на моделях плит, після чого переходили до дослідження плит серійного виробництва. Загалом було випробувано:

- 12 моделей багатопустотних плит перекриття, 6 із залізобетону та 6 зі сталефібробетону);
- 2 повнорозмірні багатопустотні плити перекриття ПК 30.12-8, одна залізобетонна, друга виготовлена зі сталефібробетону;
- 12 моделей дорожніх плит, 6 із залізобетону та 6 зі сталефібробетону;
- 2 повнорозмірні дорожні плити 1П30-18-30, одна залізобетонна, друга виготовлена зі сталефібробетону.

Стенди для випробувань представлені на рис. 1, 2

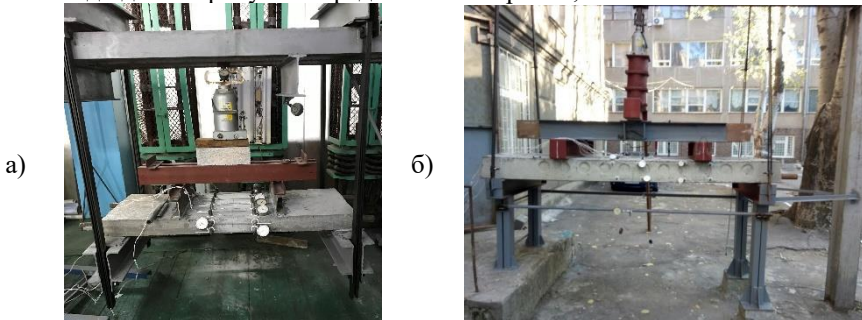


Рис. 1. Стенди для випробування багатопустотних плит:
а – модель, б – плита перекриття ПК 30.12-8



Рис. 2. Стенди для випробування дорожніх плит:
а – модель дорожньої плити, б – дорожня плита 1П30-18-30

Перед випробуванням на кожну конструкцію були змонтовані індикатори годинникового типу та наклеєні тензодатчики для вимірювання деформацій. Для фіксації прогинів використовували прогиноміри. Навантаження подавали ступенями з витримкою на кожному ступеню 10 хвилин, показники приладів знімали на кожному ступеню до та після витримки.

За результатами досліджень можна зробити висновки, що використання сталеві фібри у складі бетону для моделей багатопустотних плит перекриття дозволяє підвищити несучу здатність на 24%, та на 18% збільшити навантаження початку тріщиноутворення. Несуча здатність зросла від 27,92 кН для залізобетонних моделей до 34,71 кН для сталеві фібробетонних, навантаження початку тріщиноутворення від 16,60 кН до 19,62 кН. Використання сталеві фібри у складі бетону для багатопустотних плит перекриття ПК 30.12-8 дозволяє підвищити несучу здатність на 45%, та на 44% збільшити навантаження початку тріщиноутворення. Несуча здатність зросла від 111,84 кН для залізобетонних плит до 162,83 кН для сталеві фібробетонних, навантаження початку тріщиноутворення від 44,41 кН до 64,14 кН. По моделях дорожніх плит для консольної схеми завантаження моделі зі вмістом фібри на 32% міцніші за залізобетонні аналоги, тріщиностійкість теж відрізняється на 29%. Для прольотної схеми завантаження також моделі зі вмістом фібри показали підвищення несучої здатності на 26%, а тріщиностійкості на 20%. Зафіксовано несучу здатність для залізобетонної дорожньої плити 1П30-18-30 значенням 163,2 кН, для сталеві фібробетонної 211,2 кН, звідки можна зробити висновок про збільшення

несучої здатності на 29% при додаванні фібрових волокон до бетонної суміші при виготовленні. Навантаження відповідне початку тріщиноутворення дорівнює 86,4 кН для залізобетонної дорожньої плити та 96,0 кН для сталевібробетонної, що становить 11% різниці на рахунок плити зі вмістом фібрового волокна.

У таблиці 1 наведено основні результати випробувань

Таблиця 1

Руйнівне навантаження і навантаження початку тріщиноутворення по випробуваннях плит із залізобетону та сталевібробетону

Конструкція	Навантаження початку тріщино-утворення, кН	Несуча здатність, кН
Модель зб плити перекриття	16,60	27,92
Модель сфб плити перекриття	19,62	34,71
Плита перекриття зб	44,41	111,84
Плита перекриття сфб	64,14	162,83
Модель зб дорожньої плити, консольна схема	10,84	18,46
Модель сфб дорожньої плити, консольна схема	14,00	24,30
Модель зб дорожньої плити, прольотна схема	12,10	21,77
Модель сфб дорожньої плити, прольотна схема	14,52	27,42
Дорожня плита зб	86,40	163,20
Дорожня плита сфб	96,00	211,20

По всіх випробуваннях при порівнянні залізобетонної та аналогічної сталевібробетонної конструкції зафіксовано підвищення несучої здатності та тріщиностійкості плит при додаванні у бетонну суміш волокон сталевіброфібри.

[1]. Wang, L., He, T., Zhou, Y., Tang, S., Tan, J., Liu, Z., & Su, J. (2021). The influence of fiber type and length on the cracking resistance, durability and pore structure of face slab concrete. *Construction and Building Materials*, 282, 122706.

[2]. Zhuravskiy, Oleksandr & Zhuravska, N.E. & Bambura, A.M.. (2022). Features of calculation of prefabricated steel fiber concrete airfield slabs. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*. 14. 103–107.

[3]. Bailey C. G. Small-scale concrete slab tests at ambient and elevated temperatures / C.G.Bailey, W.S. Toh. – *Engineering Structures*, 2007, vol. 29, no. 10, – pp. 2775–2791.

[4]. Tiberti, G., Mudadu, A., Barragan, B., & Plizzari, G. (2018). Shrinkage Cracking of Concrete Slabs-On-Grade: A Numerical Parametric Study. *Fibers*, 6(3), 64.

[5]. di Prisco, M., Colombo, M. & Pourzarabi, A. Correction to: Biaxial bending of SFRC slabs: Is conventional reinforcement necessary?. *Mater Struct* 52, 123 (2019).

[6]. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: затв. наказом Мінрегіонбуду України від 24.12.2009 № 680. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.

[7]. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016. Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. [Чинний від 2017–04–01]. ДП НДІБК, 2017. 35 с. (Інформація та документація).

[8]. ДСТУ Б В.2.6–120:2010 (ГОСТ 21924.0–84, MOD). Конструкції будинків і споруд. Плити залізобетонні для покриття міських доріг. Технічні умови. [Чинний від 2011–07–01]. ТОВ НТК "Будстандарт", 2011. 37 с. (Інформація та документація).

[9]. Плити залізобетонні з напруженою арматурою для покриття міських доріг. ДСТУ Б.В.2.6-122:2010. – [чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 23 с. (Національний стандарт України).

ANALYSIS OF RESEARCH RESULTS OF TESTED REINFORCED CONCRETE AND STEEL FIBER CONCRETE SLABS

12 models of multi-hollow slabs and 12 models of road slabs were designed and manufactured, 6 each made of reinforced concrete and steel-fiber concrete. The performance under load of serial factory-produced slabs PK 30.12-8 and 1P30-18-30, one each made of reinforced concrete and steel-fiber concrete, was also investigated.

According to the results of the research, it can be concluded that the use of steel fiber in the composition of concrete for models of multi-hollow slabs allows to increase the bearing capacity by 24%, and to increase the load of the onset of cracking by 18%. The bearing capacity increased from 27.92 kN for reinforced concrete models to 34.71 kN for steel-fiber concrete. The use of steel fiber in the composition of concrete for multi-hollow slabs of PC 30.12-8 allows to increase the bearing capacity by 45%, and to increase the load of the onset of cracking by 44%. The bearing capacity increased from 111.84 kN for reinforced concrete slabs to 162.83 kN for steel-fiber concrete. According to the models of road slabs, the model with fiber content under two loading schemes is on average 29% stronger than reinforced concrete analogues, the crack resistance also differs by 25%, the addition of steel fiber to the concrete matrix contributes to an increase in strength characteristics. The bearing capacity for the reinforced concrete road slab 1P30-18-30 is recorded as 163.2 kN, for steel fiber concrete 211.2 kN, from which we can conclude that the bearing capacity increases by 29% when adding fiber fibers to the concrete mixture during manufacture.

UDC 539.3

UNIVERSAL THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT FOR MODELING DEFORMATION AND BUCKLING OF ELASTIC SHELL STRUCTURES UNDER THERMOMECHANICAL LOADING

Krivenko O.P., Cand. Tech. Sc., Senior Researcher

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Lizunov P.P., Dr. Tech. Sc., Prof.

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Kalashnikov O.B., Cand. Tech. Sc.

State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Kyiv

e-mail: olakop@ukr.net

An enhanced finite element method for analyzing the behavior of shells with inhomogeneous structure under thermomechanical loading is presented [1–5]. The proposed method is intended for modelling geometrically nonlinear deformation, buckling, post-buckling behavior, and natural vibrations of thin elastic shells of various types subjected to arbitrary combinations of mechanical and thermal fields. The shells may have complex geometries, including ribs, channels, holes, sharp bends in the mid-surface, and multilayered material structures.

The modelling of inhomogeneous shells is performed using a universal three-dimensional finite element (FE). A key feature of this universal FE is the inclusion of additional variable parameters. This special approach, based on the use of a single universal element, enables the construction of a finite-element shell model that accounts for various geometric features of structural components and material inhomogeneities of thin shells. This has considerably widened the spectrum of problems that can be analyzed. We approximate a thin multilayer shell with stepwise-variable thickness by one 3D FE throughout the thickness.

The method is developed based on the geometrically nonlinear relations of the thermoelasticity theory. A model of a linearly elastic continuum is used, whose properties comply with the generalized Duhamel–Neumann law. Large displacements with small strains are considered. The shell heating is assumed to be a steady-state process, in which the temperature field is a known function of coordinates, independent of the stress-strain state, and the thermoelastic properties of the material are constant and temperature-independent. Specific features of the stress-strain state of thin shells are considered using two non-classical hypotheses. According to the static hypothesis, the compressive stress along the thickness direction is assumed constant across the shell layer. The use of this hypothesis requires a modification of the Duhamel–Neumann law at the level of elastic constants. A kinematic hypothesis of a deformable straight line is also employed,

assuming that a line along the thickness direction (not necessarily normal to the mid-surface) remains straight after deformation, changing its length through either shortening or lengthening. The hypothesis allows to naturally model sharp bends of the middle surface of the shell, which are typical, for example, for faceted, folded, articulated or composite shells. To derive the governing equations, the moment finite-element scheme is used [6]. The moment finite-element scheme has been extended to address problems of geometrically nonlinear thermoelastic deformation of shells with stepwise-varying thickness [1].

The universal finite element is based on the “standard” 3D 8-node isoparametric FE with polylinear shape functions for coordinates and displacements [1–5] which is a classic three-dimensional FE of the casing finite element (CFE). The casing is understood as a shell body without geometric features in thickness. The CFE can be transformed into a modified finite element (MFE) for modelling shells with stepwise-varying thickness. This is achieved through the introducing of additional variable geometric parameters in the universal finite element. These additional parameters are intended to increase (or decrease) the element's size in the thickness direction and to apply shifts along the thickness. For this purpose, a method of linear transformation of the nodal coordinates of the 3D CFE into the corresponding nodal coordinates of the MFE in the thickness direction is used. This is a consequence of the adopted polylinear law of coordinate change within the FE and the formulated non-classical kinematic hypothesis of the deformable straight line. This approach defines the universality of the element.

The analysis of geometrically nonlinear deformation of the shell is based on the general Lagrangian formulation in increments. The deformation process is given as a sequence of equilibrium states at sufficiently small steps of thermomechanical loading. The static problem of geometrically nonlinear shell deformation is solved using a stepwise loading procedure. The progression of geometrically nonlinear deformation during buckling and post-buckling behavior is represented by the “load P – deflection U ” ($P-U$) curve at the characteristic point of the shell. The value of the thermomechanical loading P corresponding to the first peak of the $P-U$ curve is taken as the upper critical load P_{cr}^{up} . There is a loss of shell stability “in large”.

Shell buckling is characterized by a sharp transition from one stable equilibrium state of the shell to another. The presence of a bifurcation points in the pre-buckling domain of the $P-U$ curve indicates loss of stability “in the small”. In this case, a change in the stress-strain state of the shell occurs smoothly and without abrupt changes, and the load P^* corresponding to the first bifurcation point may be taken as the critical load [1, 3].

The algorithm for analyzing the stability and post-buckling behavior of the shell employs the parameter continuation method combined with a modified Newton–Kantorovich method and a procedure for automatic correction of algorithm parameters. A parameter-adjustment technique is applied to enable full traversal of the $P-U$ curve regardless of its complexity [1].

The applied incremental approach allows, at each step of thermomechanical loading, the determination of natural frequencies and modes of the structure, accounting for the prestressed deformed state. The modal analysis procedure is implemented at every loading increment [2–5]. The result of the analysis is the “load–lowest frequency” ($P-\omega$) curve, the corresponding frequency spectrum, and the associated modes.

If a bifurcation point appears in the pre-buckling domain of the $P-\omega$ curve, then the load P^* corresponding to $\omega_1 = 0$ may be taken as the upper critical load according to the dynamic stability criterion. In the absence of a bifurcation point, the load at the maximum of the $P-U$ curve corresponds to the upper critical load P_{cr}^{up} both statically and dynamically, as the lowest natural frequency $\omega_1 = 0$ at that point.

Overall, the algorithm for solving the shell stability problem enables the detection of a bifurcation point on the $P-U$ curve with the accuracy of the load increment. This is possible because, from a mathematical perspective, a bifurcation point is characterized by the degeneration of the determinant of the linearized system matrix, which is analyzed during the solution process.

For more accurate detection of bifurcation points on the $P-U$ curve, a technique is employed in which a small asymmetric perturbation is introduced into the initial shape of the shell. Such a perturbation can transform a bifurcation point into a critical one and also enables the identification of a new post-buckling deformation branch.

Numerical examples demonstrate the method’s capabilities in detecting bifurcation points on the $P-U$ curve. Stability analysis is performed using three approaches: degeneration of the linearized matrix (appearance of negative eigenvalues), the introduction of small perturbations into the initial shape of the shell and modal analysis.

- [1]. Bazhenov V.A., Krivenko A.P., Solovei N.A. Nonlinear deformation and stability of elastic shells of an inhomogeneous structure. – Kyiv: CJSC Vipol, 2010. – 316 p. (Ukr)
- [2]. Bazhenov V., Krivenko O. Buckling and natural vibrations of thin elastic inhomogeneous shells. – LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Deutschland, 2018. – 97 p.

- [3]. Krivenko O.P., Lizunov P.P., Kalashnikov O.B. Finite element moment scheme in problems of thermal stability and natural vibrations of elastic inhomogeneous shells. – Kyiv: Karavella, 2024. – 179 p. (Ukr)
- [4]. Kryvenko, O.P., Lizunov, P.P., Vorona, Y.V., Kalashnikov, O.B. Modeling of Nonlinear Deformation, Buckling, and Vibration Processes of Elastic Shells in Inhomogeneous Structure // Int. Appl. Mech., 2024. - 60(3). - P. 464-478. <https://doi.org/10.1007/s10778-024-01298-2>
- [5]. Krivenko, O.P.; Lizunov, P.P.; Vorona, Yu.V.; Kalashnikov, O.B. A Method for Analysis of Nonlinear Deformation, Buckling, and Vibrations of Thin Elastic Shells with an Inhomogeneous Structure // Strength of Materials and Theory of Structures: Kyiv: KNUBA, 2023. - Issue 110. - P. 131-149. doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.131-149
- [6]. Sakharov A.S., Kislookiy V.N., Kirichevsky V.V. et al. Finite element method in solid mechanics (Metod konechnykh elementov v mekhanike tverdykh tel). – Kyiv: Vishcha school. Head. publishing house, 1982. – 480 p. (Rus)

УНІВЕРСАЛЬНИЙ ТРИВИМІРНИЙ СКІНЧЕННИЙ ЕЛЕМЕНТ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДЕФОРМУВАННЯ ТА ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ПРУЖНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ДІЇ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Запропоновано удосконалений скінченноелементний метод дослідження геометрично нелінійного деформування, втрати стійкості та власних коливань тонких пружних оболонок складної структури під дією термомеханічних навантажень. Метод базується на використанні універсального тривимірного скінченного елемента зі змінними додатковими геометричними параметрами. Це забезпечує моделювання оболонок ступінчасто-змінної товщини, з отворами, зламами серединної поверхні тощо. Розв'язання задач здійснюється на основі геометрично нелінійних співвідношень термopружності та використовує варіаційне лагранжеве формулювання задачі у приростах. Модальний аналіз конструкції виконується на кожному кроці навантаження з урахуванням переднапруженого стану. Поява можливих точок біфуркації аналізується за допомогою трьох підходів: через виродження лінеаризованої матриці, модальний аналіз та введення малих збурень у вихідну форму оболонки. Результати чисельних експериментів підтверджують ефективність методу.

УДК 624.3

АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ БАЛКИ НА НЕОДНОРІДНІЙ ПРУЖНІЙ ОСНОВІ

Крутий Ю.С., д.т.н., проф., Перпері А.О., к.т.н., доц.,
 Теорло Н.А., асистент

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Розглянуто задачу про вільні згинальні коливання балки Ейлера-Бернуллі сталої жорсткості EI , яка опирається на неоднорідну суцільну пружну основу Вінклера. Загальну схему коливань зображено на рис. 1.

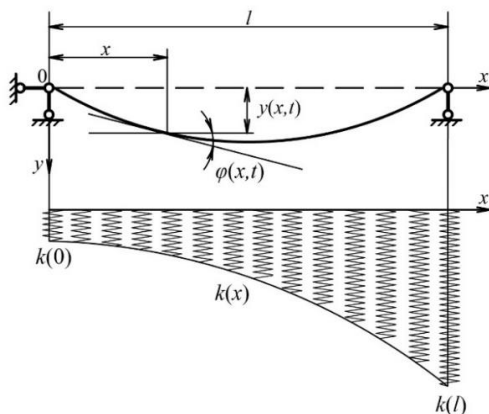


Рис. 1. Розрахункова схема коливань балки на неоднорідній пружній основі

Неоднорідність пружної основи характеризується змінним погонним коефіцієнтом постелі $k(x)$, який у загальному випадку може являти собою будь-яку неперервну функцію. Для $k(x)$ прийнято подання $k(x) = k_0 B(x)$, де k_0 – значення коефіцієнту постелі у деякій характерній точці балки, а $B(x)$ – неперервна безрозмірна функція, якою визначається закон зміни коефіцієнту постелі уздовж довжини балки.

Диференціальне рівняння вільних коливань балки, записане відносно амплітудної функції прогинів $v(x)$, матиме вигляд

$$v''''(x) + \frac{1}{l^4} (KB(x) - \Omega^2) v(x) = 0, \quad (1)$$

де

$$K = \frac{k_0 l^4}{EI}, \quad \Omega^2 = \frac{m \omega^2 l^4}{EI},$$

m – розподілена маса балки, ω – частота вільних коливань балки.

Точний розв’язок рівняння (1) знаходиться методом прямого інтегрування. Ґрунтуючись на точному розв’язку, розроблено аналітичний метод дослідження вільних коливань балки на неоднорідній пружній основі Вінклера. Метод визначається наступною сукупністю формул:

$$v(x) = C_1 X_1(x) + C_2 X_2(x) + C_3 X_3(x) + C_4 X_4(x);$$

$$X_n(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^k \Omega^{2m} \alpha_{n,m,k}(x);$$

$$\alpha_{n,0,0}(x) = \frac{1}{(n-1)!} \left(\frac{x}{l} \right)^{n-1} \quad (n=1, 2, 3, 4);$$

$$\alpha_{n,m,0}(x) = \frac{1}{(n+4m-1)!} \left(\frac{x}{l} \right)^{n+4m-1} \quad (m=1, 2, 3, \dots);$$

$$\alpha_{n,0,k}(x) = \left(\frac{x}{l} \right)^{n+4k-1} \sum_{j=0}^{\infty} c_{n,0,k,j} \left(\frac{x}{l} \right)^j \quad (k=1, 2, 3, \dots),$$

$$\alpha_{n,m,k}(x) = \left(\frac{x}{l} \right)^{n+4(m+k)-1} \sum_{j=0}^{\infty} c_{n,m,k,j} \left(\frac{x}{l} \right)^j \quad (m=1, 2, 3, \dots) (k=1, 2, 3, \dots),$$

$$c_{n,0,0,0} = \frac{1}{(n-1)!}; \quad c_{n,0,0,j} = 0 \quad (j=1, 2, 3, \dots),$$

$$c_{n,m,0,0} = \frac{1}{(n+4m-1)!}; \quad c_{n,m,0,j} = 0 \quad (m=1, 2, 3, \dots) (j=1, 2, 3, \dots),$$

$$c_{n,0,k,j} = \frac{1}{p_{n,0,k,j}} \sum_{i=0}^{\infty} B_{j-i} c_{n,0,k-1,i} \quad (k=1, 2, 3, \dots) (j=0, 1, 2, \dots),$$

$$c_{n,m,k,j} = \frac{1}{p_{n,m,k,j}} \left(c_{n,m-1,k,j} + \sum_{i=0}^{\infty} B_{j-i} c_{n,m,k-1,i} \right).$$

$$(m=1, 2, 3, \dots) (k=1, 2, 3, \dots) (j=0, 1, 2, \dots).$$

Тут C_1, C_2, C_3, C_4 – сталі інтегрування, а B_j ($j=0, 1, 2, \dots$) – коефіцієнти розкладу в ряд Маклорена функції $B(x)$ по степеням x/l .

ON THE ANALYTICAL METHOD FOR CALCULATING FREE VIBRATIONS OF A BEAM ON AN INHOMOGENEOUS ELASTIC BASE

An analytical method for calculating free vibrations of a Euler-Bernoulli beam supported on a non-uniform elastic Winkler foundation is proposed.

УДК 624.3

ТОЧНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ЗГИНУ БАЛКИ НА ПРУЖНІЙ ОСНОВІ

Крутий Ю.С., д.т.н., проф., Сур'янінов М.Г., д.т.н., проф.,
Перпері А.О., к.т.н., доц., Вакуленко В.В., аспірант
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Розглянуто задачу про згин балки з довільною неперервною змінною згинальною жорсткістю $E(x)I(x)$, що опирається на суцільну неоднорідну пружну основу, для якої прийнято гіпотезу Вінклера. На рис. 1 представлено розрахункову схему балки, де $q(x)$ – задане розподілене змінне поперечне навантаження, $y(x)$ – прогин, $\varphi(x)$ – кут повороту. На рис. 2 показані внутрішні зусилля, які виникають у поперечних перерізах балки, а саме, згинальний момент $M(x)$ і поперечна сила $Q(x)$.

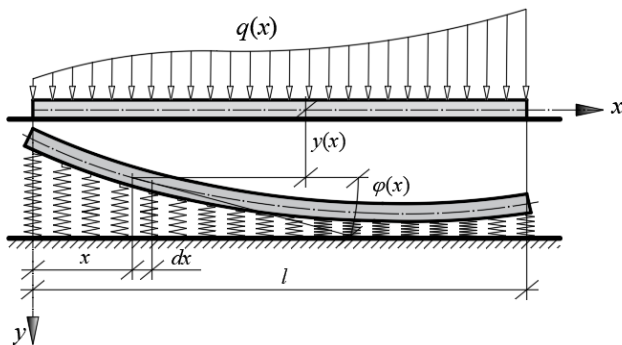


Рис. 1. Розрахункова схема балки

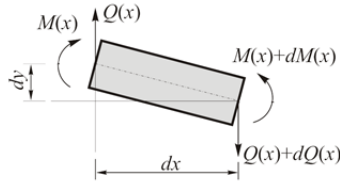


Рис. 2. Внутрішні зусилля

Для згинальної жорсткості та навантаження прийнято форми запису:

$$E(x)I(x) = E_0 I_0 A(x); \quad q(x) = q_0 C(x),$$

де $E_0 I_0$, q_0 – відповідно жорсткість та навантаження у певній характерній точці балки (наприклад, в точці $x = 0$), $A(x)$, $C(x)$ – безрозмірні неперервні функції, що виражають відповідно закони зміни жорсткості та навантаження уздовж довжини балки.

У відповідності з гіпотезою Вінклера, реакція основи на балку $R(x)$ в довільній точці x пропорційна прогину $y(x)$ з коефіцієнтом пропорційності $-k(x)$, $k(x) \geq 0$, тобто $R(x) = -k(x)y(x)$. Вважається, що $k(x)$ є довільною неперервною функцією, для якої прийнято подання $k(x) = k_0 B(x)$, де k_0 – значення погонного коефіцієнту постелі в деякій характерній точці балки, $B(x)$ – безрозмірна неперервна функція, що виражає закон зміни погонного коефіцієнту постелі уздовж довжини балки.

Диференціальне рівняння згину балки матиме вигляд

$$E_0 I_0 (A(x)y''(x))'' + k_0 B(x)y(x) = q_0 C(x).$$

Після знаходження з цього рівняння функції прогинів, решта параметрів напружено-деформованого стану балки знайдуться за допомогою відомих диференціальних залежностей.

Точний розв'язок рівняння (1) знайдено методом прямого інтегрування. Він визначається наступною сукупністю формул:

$$y(x) = y(0)X_1(x) + \varphi(0)l X_2(x) - M(0) \frac{l^2}{E_0 I_0} X_3(x) - Q(0) \frac{l^3}{E_0 I_0} X_4(x) + \frac{q_0 l^4}{E_0 I_0} X_5(x);$$

$$X_n(x) = \beta_{n,0}(x) - K\beta_{n,1}(x) + K^2\beta_{n,2}(x) - K^3\beta_{n,3}(x) + \dots \quad (n=1, 2, 3, 4, 5);$$

$$K = \frac{k_0 l^4}{E_0 I_0};$$

$$\beta_{n,0}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-1} \quad (n=1, 2); \quad \beta_{n,0}(x) = \frac{1}{l^2} \int_0^x \int_0^x \frac{1}{A(x)} \left(\frac{x}{l}\right)^{n-3} dx dx \quad (n=3, 4);$$

$$\beta_{5,0}(x) = \frac{1}{l^4} \int_0^x \int_0^x \frac{1}{A(x)} \int_0^x \int_0^x C(x) dx dx dx dx ;$$

$$\beta_{n,k}(x) = \frac{1}{l^4} \int_0^x \int_0^x \frac{1}{A(x)} \int_0^x \int_0^x B(x) \beta_{n,k-1}(x) dx dx dx dx \quad (n = 1, 2, 3, 4, 5) (k = 1, 2, 3, \dots).$$

Грунтуючись на даному точному розв'язку, автори в подальшому націлені на розробку аналітичного методу розрахунку балок змінної жорсткості на неоднорідній пружній основі Вінклера.

EXACT SOLUTION OF THE DIFFERENTIAL EQUATION OF BEAM BENDING ON AN ELASTIC BASE

An exact solution of the differential equation of bending of a Euler-Bernoulli beam of variable continuous stiffness resting on a non-uniform continuous elastic Winkler foundation is presented.

УДК 593.3

ІМОВІРНІСНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ЖИВУЧОСТІ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПОШКОДЖЕННЯМИ ВІД ВИБУХОВИХ ПРИСТРОЇВ

**Лук'янченко О.О., д.т.н., проф., Геращенко О.В., к.т.н., ст.н.сп.,
Костіна О.В., к.т.н., доц.**

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

Особливу увагу у воєнний час набуває проблема надійності і живучості захисних оболонкових споруд вразі появи в них пошкоджень від вибухових пристроїв [1-3]. Розроблено імовірнісний підхід до оцінки живучості захисних тонкостінних оболонкових споруд з пошкодженнями від ударно-теплового впливу вибухових пристроїв із застосуванням обчислювальних процедур програмного комплексу скінченноелементного аналізу. Передбачено формування багатопараметричної моделі пошкоджень поверхні оболонки від ударної хвилі і осколків вибухових пристроїв. Враховані гіпотези теорії удару від вибуху

щодо поширення ударної хвилі у вигляді півсфери з зонами однакового максимального тиску і імпульсу, значення яких залежать від виду і маси вибухової речовини та відстані від центру вибуху до конструкції; теорії удару і ймовірності щодо представлення впливу осколків на конструкцію у вигляді колових отворів, розмір і кількість яких задаються випадковими функціями з нормальним законом розподілу їх щільності ймовірності; теорії надійності і безпеки щодо оцінки живучості пошкодженої конструкції за ймовірністю їх відмови за кількістю викидів та середньої тривалості викиду реакції конструкції за межі напружень і деформацій руйнування при дії експлуатаційних випадкових навантажень (сніг, вітер) [4].

Перший етап досліджень передбачає побудову скінченно-елементної моделі оболонки у вигляді сукупності трикутних оболонкових скінченних елементів з шістьма ступенями вільності у вузлах; створення півсферичної геометричної моделі ударної хвилі; визначення зон поверхні оболонки, на які діє ударна хвиля однакового максимального надлишкового тиску і імпульсу. Надлишковий тиск подається рівномірним навантаженням з відповідними до визначених зон поверхні оболонки значеннями і кутами атаки. Вплив імпульсу позитивної фази ударної хвилі на динамічну поведінку оболонки досліджується в нелінійній постановці методом Ньюмарка. На другому етапі досліджується вплив осколків вибухових пристроїв на оболонку. В скінченноелементну модель оболонки з урахуванням напружено-деформованого стану конструкції від ударної хвилі додається уявна нерегулярна перфорація поверхні оболонки у вигляді колових отворів. Кількість і діаметри отворів, які залежать від маси осколків і відстані до центру вибуху, розглядаються як випадкові величини з нормальним законом розподілу її функції щільності ймовірності. Виконується нелінійний динамічний розрахунок оболонки методом Ньюмарка відповідно від сумісного теплового і ударного впливу осколків, який у вигляді зосереджених сил

прикладається до центрів уявних отворів. Дослідження надійності і живучості виконуються для скінченноелементної моделі оболонки з крізними отворами. Оцінку надійності пошкодженої оболонки запропоновано виконувати на основі розрахунку імовірності її відмови через функцію резерву несучої здатності за кількістю викидів за межу напружень (межа пластичності) і деформацій (межа допустимих деформацій) руйнування від дії експлуатаційних навантажень (сніг, вітер), які описуються стаціонарними або квазістаціонарними випадковими процесами. Живучість пошкодженої конструкції запропоновано оцінити на основі визначення середнього часу перебування реакції оболонки на дію експлуатаційних випадкових навантажень за межами напружень і деформацій руйнування та середньої тривалості викиду.

- [1]. Yang T., Luo Y., Hu G., Jiang Y. Probability Distribution and Determination of Blast Loading during Structural Blast Resistant Study // Shock and Vibration. – Vol. 2022.– Article ID 7367288.
- [2]. Tamsah J., Jahami A., Aouad Ch. Silos structural response to blast loading // Engineering Structures. – 2021. – Vol. 243(4). – Article ID 112671.
- [3]. Al-Yacoby A.M., Hao L.J., Liew M.S., Ratnayake R.M.S., Samarakoon S.M.K. Thin-Walled Shell Storage Tank under Blast Impacts: Finite Element Analysis // Materials, 2021. – Vol. 143. – 7100.
- [4]. Augusti G, Baratta A., Casciati F. Probabilistic Methods in Structural Engineering. – London New York. Chapman and Hall, 1984. – 547 p.

THE PROBABILISTIC APPROACH FOR THE ESTIMATION OF VITALITY OF THE SHELL CONSTRUCTIONS WITH DAMAGES FROM EXPLOSIVE DEVICES

The probabilistic approach for the estimation of vitality of the protective thin shell constructions with damages from explosive devices using of calculable procedures of modern software of finite element analysis was created. The new probabilistic multiparametric model of shell surface damages from shock thermal influence of explosion and fragments of explosive devices was created. It is suggested to execute the estimation of vitality of the damaged thin shell constructions on the basis of probability of their failure that based on the quantity of outcasts and middle duration of outcasts of construction's reactions the outside of tensions and deformations of destruction from the operational random loads.

УДК 614.84

ОЦІНКА СТІЙКОСТІ МОНОЛІТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ ТА ВИБУХУ

Майборода Р.І., Отрош Ю.А., д.т.н., проф.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Прогресуюче обвалення є однією з найнебезпечніших форм руйнування будівель, коли локальне пошкодження окремого несучого елемента, як правило, вертикальної колони, спричиняє втрату здатності всієї системи чинити опір перерозподіленім навантаженням. У таких випадках спостерігається ланцюгове руйнування суміжних елементів, що може охопити значну частину будівлі або призвести до її повного обвалення.

Подібні явища, підтверджені низкою трагічних прикладів – зокрема обвалення секції будинку Ronan Point у Лондоні в 1968 році, руйнування федеральної будівлі в Оклахома-Сіті в 1995 році та катастрофа Всесвітнього торгового центру в 2001 році – виявили уразливість будівель перед комбінацією локальних пошкоджень. Ці події стали каталізатором для оновлення нормативних документів і формування підходів до конструктивного забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та вибуху. Однак у багатьох випадках чинні методики залишаються спрощеними, часто заснованими на припущенні миттєвого видалення окремих критичних елементів, без належного врахування реального сценарію послідовного впливу пожежі та вибухового навантаження [1].

Особливої актуальності ця проблема набуває для залізобетонних конструкцій, з огляду на складну фізико-механічну поведінку бетону та арматури при високих температурах і подальшому впливі динамічного навантаження. Тривала дія пожежі призводить до значного ослаблення конструкції: знижується міцність бетону, арматура втрачає несучу здатність у розтягнених зонах, порушується зчеплення між арматурою та бетоном, формується система тріщин, виникають пластичні деформації та знижується жорсткість елементів.

За наявності локальних пошкоджень у зонах стику «колона–перекриття», температурний вплив пожежі формує передумови до втрати просторової роботи конструкції. Утворення шарнірів або зменшення опорних жорсткостей порушує загальну стійкість системи, що сприяє розвитку механізму прогресуючого обвалення. У цьому ослабленому стані навіть

відносно короткочасний вибуховий імпульс, що накладається після пожежі, може спричинити руйнування елементів, порушення вузлів, зсув плит і втрату геометричної цілісності.

Таким чином, вибух, що діє як вторинне навантаження після пожежі, прискорює руйнування конструкції. Комбінація зміни властивостей матеріалів під дією температури і додаткова дія миттєвого динамічного імпульсу збільшує пошкодження у часі, підсилює нестабільність, порушує контактні зв'язки та спричиняє каскадну втрату несучої здатності відповідальних елементів будівлі.

Найбільш вразливими в цьому сценарії є вузлові зони стику вертикальних і горизонтальних елементів – «колона–перекриття». Втрата цілісності таких вузлів, навіть локального масштабу, може призвести до виведення з роботи значної частини перекриття або фрагмента просторового каркаса.

Незважаючи на численні теоретичні дослідження прогресуючого обвалення, більшість з них зосереджені на сталевих конструкціях. Водночас залізобетонні будівлі мають інші принципи руйнування та складнішу теплову поведінку, що вимагає окремих дослідницьких підходів. У сучасній літературі спостерігається брак комплексних моделей, які б охоплювали механічну, термічну та динамічну реакцію залізобетонних систем у разі вибуху з подальшою пожежею чи навпаки.

У зв'язку з цим стає критично необхідною розробка методики оцінювання стійкості монолітних залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення, яка б враховувала фазову послідовність дії навантаження, пошкодження вузлів, втрату жорсткості, пластичні деформації та зміну властивостей матеріалів за підвищених температур. Методика повинна базуватись на врахуванні просторової взаємодії конструкцій, враховувати контактні умови в зоні вузлів, зміну властивостей матеріалів у часі, механізми втрати стійкості при тепловому впливі, а також реальні критерії відмови конструкцій [2].

Після реалізація такої методики необхідна побудова деталізованої комп'ютерної моделі, яка б забезпечувала точне відображення просторової структури будівлі, геометрію конструктивних елементів, типів з'єднань, фізико-механічних характеристик матеріалів та температурного впливу. Така модель має включати алгоритми визначення локального руйнування та можливість відслідковування послідовності обвалення у часі. У моделі повинні бути реалізовані умови зміни міцності бетону й арматури, вплив радіаційного та конвективного теплообміну, контактна передача тепла та сил у зоні колона–перекриття, а також критерії втрати несучої здатності на основі граничних деформацій і температур.

Завдяки такому підходу стане можливим вперше комплексно оцінити поведінку залізобетонної системи в умовах комбінованого навантаження, виявити критичні вузли, оптимізувати проєктні рішення та сформулювати технічні рекомендації щодо підвищення стійкості до прогресуючого обвалення. Це дозволить не лише розширити наукове уявлення про механізми руйнування конструкцій, а й забезпечити реальні інженерні заходи для підвищення надійності та безпеки об'єктів різного призначення.

[1] Майборода Р.І. Аналіз можливості проведення розрахунків на стійкість будівель та споруд до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі. Матеріали круглого столу (вебінару). – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 23 лютого 2023. – С.112

[2] Майборода Р.І., Отрош Ю.А. Необхідність дослідження несучих залізобетонних конструкцій прогресуючому обваленню будівель та споруд в умовах вибуху та післявибухової пожежі. Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків. Матеріали круглого столу (вебінару). – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 29 лютого 2024. С. 34-35

ASSESSMENT OF THE RESISTANCE OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE BUILDINGS TO PROGRESSIVE COLLAPSE UNDER THE EFFECT OF FIRE AND EXPLOSION

The paper notes the resistance of reinforced concrete buildings to progressive collapse under the influence of fire and explosion. It is shown that the combination of high temperatures and dynamic impulse causes internal stiffness of the “column-slab” type nodes and triggers a cascade of destruction. The lack of methods that take into account the phase sequence of loading and changes in material properties is noted. The creation of a comprehensive method and computer model is proposed, which allows for an accurate assessment of the behavior of the structure and an increase in its stability.

УДК 691.22:69.003.2

СУХІ БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ В РЕМОНТІ ТА ОЗДОБЛЕННІ: ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Макаренко О.В., к.т.н., доц.

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова,
м. Харків, olga.fxm@gmail.com

Війна жорстоко триває на території України. Катастрофічні руйнування залишили без домівок сотні тисяч українців. Отже, відновлення пошкодженого та зведення нового житла стало нагальною потребою для повернення до нормального життя та відбудови країни. В цьому контексті особливої актуальності набуває забезпечення будівельної галузі необхідними матеріалами, серед яких важливе місце займають сухі будівельні суміші (СБС) [1]. Їхня популярність зумовлена зручністю використання, стабільними показниками якості, універсальністю, великим асортиментом та можливістю виконання широкого спектра завдань – від вирівнювання поверхонь до фінішного оздоблення. Використання їх на різних етапах відновлювальних робіт роблять налагодження та розширення виробництва СБС стратегічно важливим завданням будівельної галузі.

На українському ринку представлено ряд вітчизняних виробників сухих будівельних сумішей з широким асортиментом продукції. Серед них вирізняється Polimin, відомий якісними та доступними матеріалами для тинькування, шпаклівками, клеями, стяжками та гідроізоляцією. Компанія Siltek пропонує клейові, гідроізоляційні, мурувальні суміші; матеріали для підлог, теплоізоляції; ґрунтовки, штукатурки та фарби. Master спеціалізується на декоративних штукатурках та фасадних утеплювальних рішеннях. Будмайстер та Єврогіпс є популярними виробниками цементних і гіпсових штукатурок та шпаклівок. Виробник Kreisel, частина міжнародної групи, має українське виробництво якісних СБС. Харківська компанія Токан також є знаним виробником, що випускає понад 30 видів продукції, включаючи матеріали для підлог, стін, облицювання, декоративні та фінішні покриття, гідроізоляцію та системи утеплення [2].

Використання сухих будівельних сумішей має низку незаперечних переваг. По-перше, СБС – високоякісний продукт з наперед заданими міцністю, адгезією, пластичністю та часом твердіння, що гарантується його заводським виробництвом. Автоматичні лінії забезпечують точне дозування компонентів, ретельне перемішування та контроль якості на кожному етапі. По-друге, практика модифікації СБС спеціальними добавками сприяє

покращенню їх експлуатаційних характеристик: морозостійкості, вологостійкості, тріщиностійкості, адгезії до різних основ та легкоукладальності.

Використання сухих будівельних сумішей є ключовим на багатьох етапах ремонтних та оздоблювальних робіт, а їх правильний вибір гарантує якісний та довговічний результат.

На підготовчому етапі слід створити чисту та міцну основу для подальших робіт. Необхідно ретельно видалити пил, бруд, залишки старої фарби чи шпалер. Наприклад, для очищення бетонної стіни від пилу використовують металеві щітки або промислові пілососи. Масляні плями видаляють спеціальними розчинниками.

Глибокі тріщини в стінах або вибоїни в підлозі потребують попереднього заповнення. Для цього застосовують ремонтні суміші на цементній або полімерній основі, які мають високу міцність зчеплення з основою. Наприклад, для заповнення тріщини в цегляній кладці використовують спеціальну цементну ремонтну суміш, яка запобігає її подальшому розширенню.

Для покращення адгезії між основою та наступними шарами (тинькування, шпаклівкою, клеєм) обов'язково наносять ґрунтовку. Вибір ґрунтовки залежить від типу основи (бетон, цегла, гіпсокартон) та виду СБС, що буде використовуватися. Наприклад, для гіпсокартонної стіни перед шпаклюванням застосовують акрилову ґрунтовку, яка зменшує поглинання та забезпечує краще зчеплення шпаклівки. Готовий розчин наноситься на підготовлену поверхню за допомогою відповідного інструменту (шпателя, кельми, терки, правила, штукатурної станції) рівномірним шаром необхідної товщини. При виконанні облицювальних робіт клей наноситься на основу або на зворотний бік плитки.

Підготовчі роботи. Вирівнювання стін та стель виконується цементними або гіпсовими штукатурними сумішами). Цементні штукатурки відрізняються високою міцністю та вологостійкістю і застосовуються у вологих приміщеннях або для зовнішніх робіт. Гіпсові штукатурки забезпечують більш гладку поверхню та швидше висихають, тому частіше використовуються для внутрішніх робіт у сухих приміщеннях. Наприклад, для вирівнювання цегляної стіни з перепадами до 5 см використовують цементну штукатурку, наносячи її шарами за допомогою маяків.

Влаштування стяжки підлоги. Для створення рівної горизонтальної основи під підлогові покриття застосовують цементні або самовирівнювальні суміші. Цементні стяжки є більш міцними та використовуються при значних перепадах висот. Самовирівнювальні суміші мають високу плинність і дозволяють швидко створити ідеально рівну поверхню під ламінат або лінолеум. Наприклад, для підготовки підлоги у вітальні перед укладанням

паркетної дошки використовують самовирівнювальну суміш, яка усуває невеликі нерівності та забезпечує гладку основу.

При зведенні стін та перегородок для міцного з'єднання цегли або блоків (газобетонних, керамічних тощо) використовують цементні клейові або кладочні суміші. Наприклад, для кладки міжкімнатної перегородки з газобетонних блоків застосовують клей для газобетону, який має високу адгезію та тонкий шов, що покращує теплоізоляційні властивості стіни.

Облицювальні роботи. Укладання плитки. Для надійного приклеювання керамічної плитки, керамограніту, мозаїки на стіни та підлогу використовують спеціальні клейові суміші. Вибір клею залежить від розміру та типу плитки (наприклад, для великих форматів потрібен клей з підвищеною адгезією), а також умов експлуатації (для ванних кімнат використовують вологостійкий клей). Наприклад, для облицювання стін ванної кімнати керамічною плиткою використовують еластичний вологостійкий клей, який витримує перепади температури та вологість.

Монтаж гіпсокартону. Для кріплення гіпсокартонних листів до металевого або дерев'яного каркаса, а іноді безпосередньо до стін, застосовують гіпсовий клей або спеціальні монтажні суміші, що гарантує швидке схоплення та міцне з'єднання. Суміш наноситься точково на зворотний бік листа.

Фінішні оздоблювальні роботи. Шпаклювання стін та стель. Для створення ідеально гладкої та рівної поверхні перед фарбуванням або обклеюванням шпалерами використовують гіпсові або полімерні шпаклювальні суміші. Перші легко наносяться та шліфуються, але не вологостійкі. Другі мають кращу адгезію та еластичність. Так підготовку стін під фарбування виконують фінішною полімерною шпаклівкою, яка дозволяє отримати ідеально гладку поверхню без подряпин.

Декоративне оздоблення. Для створення оригінальних фактурних поверхонь застосовують декоративні штукатурки («венеціанська», «короїд», «баранець»). Різні за складом та нанесенням вони створюють естетичні візуальні ефекти. Наприклад, штукатурення «короїд» завдяки дрібним гранулам у складі СБС природно відтворює відому ваду деревини.

Гідроізоляційні роботи. У приміщеннях з підвищеною вологістю (ванні кімнати, кухні, санвузли) на поверхні, що контактують з водою (підлога, стіни у зоні душу), наносять гідроізоляційні суміші для створення водонепроникного бар'єра. Він є запорукою збереження будівельних конструкцій від зволоження та подальшого руйнування. Наприклад, перед укладанням плитки у душовій кабіні на стіни та підлогу наносять еластичну цементну гідроізоляційну мастику в кілька шарів.

Сучасний ринок сухих будівельних сумішей демонструє динамічний розвиток, орієнтований на інноваційність, ефективність і екологічність

продукції. Активно впроваджуються багатофункціональні склади, які спрощують вибір матеріалів для споживача, оптимізують витрати та забезпечують високу якість виконання робіт. Одним із провідних напрямів розвитку є покращення експлуатаційних характеристик СБС, зокрема міцності, стійкості до впливу зовнішніх чинників і тривалого терміну служби. Зростає частка екологічно чистих сумішей, виготовлених із використанням вторинної сировини та з мінімальним вмістом шкідливих компонентів. Водночас розширюється асортимент спеціалізованих СБС для виконання вузькопрофільних завдань, таких як реставрація архітектурної спадщини, улаштування систем теплої підлоги, або ремонт у складних умовах експлуатації. Інноваційним напрямом є впровадження нанотехнологій – додавання наночастинок у склад сумішей, що суттєво покращує їх щільність, зносостійкість і довговічність.

В рамках післявоєнного відновлення інфраструктури України продукція вітчизняних виробників сухих будівельних сумішей набуває особливого значення. Її широке застосування забезпечує реалізацію будівельних і ремонтних завдань на різних етапах реконструкції житлового фонду, сприяючи якості, надійності та швидкості виконання робіт.

[1]. ДСТУ Б В.2.7-126:2011 Будівельні матеріали. Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови. – [Чинний від 2011-01-06]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 63 с.

[2]. Сухі будівельні суміші [Електрон. ресурс] : Електрон. текст. дані. – Режим доступу:

https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%83%D1%85%D1%96_%D0%B1%D1%83%D0%B4%D1%96%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%96_%D1%81%D1%83%D0%BC%D1%96%D1%88%D1%96, вільний (дата звернення: 09.05.2025). – Назва з екрана.

DRY BUILDING MIXES IN REPAIR AND DECORATION: PRACTICAL APPLICATION

У роботі висвітлюється актуальність використання сухих будівельних сумішей у сучасних ремонтно-оздоблювальних роботах. Представлено основні види сухих будівельних сумішей та наведено їх застосування на різних етапах будівельного процесу. Розглянуто технологічні аспекти приготування та нанесення сумішей, що безпосередньо впливають на якість кінцевого результату. Проаналізовано перспективи вдосконалення сухих будівельних сумішей шляхом створення багатофункціональних, екологічно безпечних та інноваційних продуктів. Зазначено, що грамотне застосування сухих будівельних сумішей з урахуванням умов конкретного об'єкта сприяє оптимізації технологічного процесу і забезпечує високий рівень якості виконаних робіт.

УДК 625.7

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З АРМУВАННЯМ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ПОКРИТТІВ

Краюшкіна К.В., к.т.н., доц., Осовський І.М., аспірант

Київський авіаційний інститут, м. Київ

Створення доріг і розвиток інфраструктури необхідний для успішного освоєння природних ресурсів та іноваційного розвитку економіки. Однією з важливих задач дорожнього будівництва є ефективне використання ресурсів, які виділяються, підвищення строку служби і транспортно-експлуатаційних показників автомобільних доріг. Дана стаття присвячена основним результатам досліджень по армуванню асфальтобетонних покриттів геосітками і плоскими георешітками.

Відомо, що підвищення довговічності і тріщиностійкості, тобто надійності асфальтобетонних покриттів є актуальною проблемою для більшості автомобільних доріг.

При сучасних темпах підвищення інтенсивності руху і росту динамічних навантажень від автотранспортних засобів, постійно посилюються вимоги до міцності асфальтобетонних покриттів, зсувостійкості, тріщино- та зносостійкості. Крім цього, для забезпечення безпечного руху автомобілів з розрахунковими швидкостями повинно бути рівномірне сприйняття і перерозподілення осевих навантажень через покриття на нижчезрештовані шари основи [1].

Вивчено, що при появі в асфальтобетонному покритті наскрізних тріщин одразу зникає монолітність покриття, порушується рівномірність передачі навантажень на шари основи дорожньої конструкції, і як наслідок, різко збільшуються напруження втоми, накопичуються і збільшуються деформації та незворотні структурні руйнування асфальтобетону.

Визначено, що традиційні методи ремонту - закладення тріщин, укладання нового верхнього шару не вирішують проблему, а тільки тимчасово покращують ситуацію, так як деформації, що утворилися в шарах основи розповсюджуються і на верхній шар, викликаючи передчасні руйнування.

Результати діагностики автомобільних доріг України свідчать про їх недостатню надійність. Так, більше 40 % доріг потребують збільшення міцності.

Досліджено, що застосування геосинтетичних матеріалів для направленої армування шарів дорожніх конструкцій суттєво підвищує стійкість верхнього шару покриття до дії різних негативних факторів (погодно-кліматичних і транспортних) та довговічність.

Армування асфальтобетону геосинтетичними матеріалами є одним з найбільш ефективних способів збільшення міжремонтних строків, підвищення величини навантажень, що сприймаються та зниження витрат на експлуатацію і поточний ремонт покриттів автомобільних доріг [2].

Асфальтобетон, широке застосування якого в світі почалося з минулого століття, залишається найбільш розповсюдженим матеріалом для улаштування покриттів автомобільних доріг. Однак фізичні можливості асфальтобетонних покриттів тривалий час зберігають високу міцність, рівність та суцільність при високих навантаженнях, поступово вичерпуються.

Армуючий матеріал покликаний:

- сприймати і перерозподіляти горизонтальні нормальні розтягуючі напруження і запобігати надлишковій горизонтальній деформації подовження поблизу підшви шару при його згині, які виникають при багаточисельних короточасних впливах колісного навантаження від автотранспорту;

- сприймати і перерозподіляти горизонтальні нормальні розтягуючі напруги і передбачати надлишкову деформацію, які виникають в деяких перерізах від тривалого температурного впливу [3].

З позицій критеріїв розрахунку нежорстких дорожніх одягів, введення в асфальтобетонне покриття армуючої геосітки дозволяє збільшити його міцність по критерію допустимого пружного прогину, збільшити опір руйнуванню втоми від розтягування при згині, підвищити опір розтягуючим температурним напруженням.

При правильному конструюванні, виконанні і використанні якісних геосинтетичних матеріалів суттєво (до 50 %) зменшується колісестворення на покриттях. В 2-3 рази збільшується крок температурних тріщин, в 1,5-2 рази збільшується строк служби асфальтобетонних покриттів навіть в складних кліматичних умовах [3-5].

Однак далеко не всі геосинтетичні матеріали в повній мірі можуть виконувати армуючі функції. Базуючись на власних дослідженнях, вітчизняних та закордонних публікаціях, були сформовані десять принципових вимог, дотримання яких підвищує ефективність армування асфальтобетонних покриттів, оптимізували властивості армуючих геосинтетичних матеріалів.

Застосування геосинтетичних матеріалів в дорожніх конструкціях позитивно впливає на:

- збільшення міжремонтних строків служби армованого покриття і зниження витрат на його утримання за рахунок уповільнення темпів тріщиноутворення і колеєутворення;
- зниження витрат на будівництво покриття за рахунок деякого зменшення його товщини (без збільшення міжремонтних строків служби).

1. Подтиккан А.М., Ярещенко Н.В. Застосування геосинтетичних армуючих матеріалів при будівництві, ремонті та реконструкції автомобільних доріг // Харківський національний автомобільно-дорожній університет. — Харків, 2019. — С. 45–50.
2. Геосинтетичні матеріали в гідротехнічному та дорожньому будівництві Аналіз використання геосинтетичних матеріалів в Україні з врахуванням досвіду США та ЄС // ResearchGate, 2021.
3. Krajushkina, E.V.; Vyrozhemsky, V.K. ; Khimerik, T. Yu. 2005. Improving crack resistance and roughness of road surfaces by using bitumen-polymer compositions. Reliability problems of pavement on city streets and roads: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Minsk: 187–194.
4. ГБН В.2.3-37641918-544:2014 Автомобільні дороги. Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. Основні вимоги.
5. Krajushkina, E. ; Belyatynsky, A. 2013. Application of three-dimensional geogrids for stabilization of waterlogged soils in Ukraine, Roads 25: 50–52.

PROSPECTS OF USING ROAD CLOTHING WITH REINFORCEMENT OF ASPHALT CONCRETE SURFACES

The purpose of this article is to study the problem of designing strong, durable and cost-effective road surfaces. The article considers the issue of practical application of geogrids and flat geogrids for reinforcing asphalt concrete pavements in new road construction.

УДК 691.32:620.191.33

МЕТОДИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДЕФОРМАЦІЙ СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мартинюк Н.О., аспірант, Мікуліч О.А., д.т.н., проф.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

Однією з актуальних проблем сучасної механіки є дослідження поведінки структурно неоднорідних матеріалів під навантаженням. Такі матеріали, як правило, мають складну мікроструктуру, що суттєво впливає на

характер виникнення локальних деформацій і руйнувань. Традиційні методи механічного аналізу, засновані на використанні тензометричних або оптичних приладів, не завжди дозволяють точно відстежити розподіл деформацій у реальному часі з необхідною просторовою роздільною здатністю. У зв'язку з цим зростає інтерес до застосування методів комп'ютерного зору та машинного навчання для аналізу візуальних даних, отриманих під час експериментальних випробувань [1, 5].

У рамках даного дослідження було розроблено комплекс алгоритмів для автоматичного виявлення та аналізу деформацій за цифровими зображеннями поверхні зразків під час навантаження. Основу методики складає використання нейронних мереж та методів оптичного потоку, зокрема методів на основі структури Lucas-Kanade [2], Farnebäck Optical Flow [3] та новітніх варіацій, що інтегрують елементи глибокого навчання [5]. З їх допомогою стало можливим оцінити зміщення характерних точок поверхні та побудувати просторові карти деформацій з високою точністю.

Окрему увагу приділено попередній обробці зображень, яка включає корекцію освітлення, фільтрацію шумів, підвищення контрасту та виявлення зон з локальними концентраціями напружень. Застосовано методи сегментації на основі кластеризації та згорткових нейронних мереж (CNN), що дозволяє ізолювати ділянки з потенційною концентрацією напружень та простежити за їх еволюцією у часі [4].

Дослідження проводились на зразках композитних матеріалів із включеннями різної жорсткості, що дозволило змоделювати умови структурної неоднорідності. Зразки піддавались монотонному навантаженню з поетапною зйомкою поверхні. Для підвищення достовірності вимірювань на поверхню зразків наносився випадковий точковий шаблон (спекл), що забезпечувало високу точність кореляційного аналізу. Результати комп'ютерного аналізу деформацій порівнювались з експериментальними даними, отриманими за допомогою цифрової кореляції зображень (DIC) [1] та класичних тензометричних методів.

Було встановлено, що розроблена методика дозволяє з високою точністю відтворити поля деформацій та виявити потенційні зони руйнування на ранніх етапах навантаження. Аналіз на основі комп'ютерного зору демонструє високу кореляцію з даними традиційних методів, при цьому значно перевершуючи їх у швидкості обробки та рівні автоматизації. Метод також є придатним до масштабування на складніші геометрії та може бути адаптований для роботи в умовах польових випробувань.

Застосування методів комп'ютерного зору в механіці відкриває нові можливості для аналізу складних об'єктів і створює передумови для розробки інтелектуальних систем моніторингу технічного стану конструкцій. Впровадження таких підходів у промислову практику може значно

покращити точність діагностики, передбачення виходу з ладу та оптимізацію процесів експлуатації елементів конструкцій, виготовлених з неоднорідних матеріалів.

[1] Sutton, M.A., Orteu, J.J., Schreier, H.W. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications. Springer, 2009.

[2] Lucas, B.D., Kanade, T. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1981.

[3] Farnebäck, G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion. Proceedings of the 13th Scandinavian Conference on Image Analysis, 2003.

[4] Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. MICCAI, 2015.

[5] LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. Deep learning. Nature, 2015.

COMPUTER VISION METHODS FOR DEFORMATION ANALYSIS OF STRUCTURALLY HETEROGENEOUS MATERIALS

The paper presents a computer vision approach for real-time deformation analysis of structurally heterogeneous materials. The proposed methodology includes the use of neural networks, optical flow methods, and advanced image preprocessing techniques. Comparative studies with experimental data confirm the method's accuracy and reliability. The results may be applied for intelligent structural monitoring systems and predictive failure analysis in engineering applications.

УДК 531

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВІБРОПОГЛИНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІНИСТИХ ТА ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Мікуліч О.А., д.т.н., проф., Сад О.В., аспірант

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

Робота присвячена розробці методу оцінки вібропоглинальних властивостей структурно-неоднорідних матеріалів та протестована для пінистих та пористих матеріалів. В основу методики покладено підхід щодо вивчення оптимальності механічних характеристик у рамках уточнених моделей механіки суцільних середовищ та апарату хвильової механіки [1].

Результати моделювання базуються на використанні даних експериментальних досліджень для спінених полімерних матеріалів із закритими порами [2].

У рамках моментного континууму Коссера [3] за використання апарату хвильової механіки для оцінки вібропоглинальних властивостей застосовано аналітичні формули для розрахунку швидкостей поширення хвиль зсуву-обертання та залежності для знаходження фазової швидкості [1].

Для симуляційного аналізу зміни механічних характеристик пін використана модель, що враховує нелінійну залежність цих характеристик від фізичних (густина) та мікроструктурних (пористість матеріалу та розміри пор) властивостей. Запропонований підхід дозволяє проводити оцінку впливу зазначених факторів (густини матеріалу та розмірів пор) на зміну зсувно-обертальних хвиль у структурно-неоднорідному середовищі.

Представлений у роботі метод аналітико-числового моделювання, що ґрунтується на сумісному використанні методів математичного моделювання та результатів експериментальних досліджень, характеризується зручністю та практичністю щодо його використання для спінених, пористих та інших типів структурно неоднорідних матеріалів. Перевагою такого підходу є можливість без спеціальних лабораторних досліджень оцінити механічні характеристики спінених матеріалів, які широко використовуються у виробництві.

Запропонований у роботі метод дозволяє істотно розширити сферу застосування спінених полімерів та оцінити їх експлуатаційний ресурс.

[1]. Mikulich, O. (2023) Wave Propagation Speed Analysis in Polyurethane Foams. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 465–472.

[2]. Mikulich O., Furs T., Shvabyuk V., Changes in the Mechanical Characteristics of Polyurethane Foam under Multi-Cycle Loading: Experimental Study. Materials Science Forum 1141 (2024) 79–83.

[3]. Sulym, H., Mikulich, O., Shvabyuk V. (2018) Investigation of the dynamic stress state of foam media in Cosserat elasticity. Mechanics and Mechanical Engineering, 22(3), 739–749.

METHODOLOGY FOR ASSESSING VIBRO-ABSORBING PROPERTIES OF FOAM AND POROUS MATERIALS

The work is devoted to the development of a method for assessing the vibration-absorbing properties of structurally inhomogeneous materials and tested for foamed and porous materials. The methodology is based on an approach to studying the optimality of mechanical characteristics within the framework of refined models of continuum mechanics and the apparatus of wave mechanics.

УДК 531

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПОВТОРНО-ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ У ПІНИСТИХ МАТЕРІАЛАХ ЗА НАЯВНОСТІ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

**Мікуліч О.А., д.т.н., проф., Крадінова Т.А., к.т.н., доц.,
Гуда О.В., к.т.н., доц., Коменда Н.В., к.т.н., доц.**

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

Вплив навантажень, що викликають пластичні деформації у пінистих матеріалах, не спричиняють істотних руйнувань, особливо у м'яких пінополіуретанах, що дозволяє подальшу експлуатацію відповідних елементів. Проте, дослідження впливу таких навантажень є актуальним, особливо за дії повторних впливів, оскільки дозволяє оцінити зміну механічної поведінки при повторному навантаженні.

У [1] експериментально досліджено зміну механічних характеристик за дії навантаження, що спричиняють пластичні деформації у зразках з пінополіуретану при повторному навантаженні. Ці результати використані у роботі для моделювання динамічного напруженого стану відповідних пінополіуретанових елементів з різним співвідношенням компонент за дії навантаження, що спричиняє пластичні деформації.

На відміну від крихких пінистих матеріалів, наявність пластичних деформацій у яких призводить до виникнення тріщин та не дозволяє їх подальшого навантаження, у м'яких матеріалах відбувається лише зміна мікроструктури та механічних характеристик матеріалу [1].

Тому у роботі проведено дослідження щодо аналітично-числового моделювання механічної поведінки пінистих структурно-неоднорідних матеріалах за дії силових впливів, що викликають пластичні деформації на основі методу, запропонованого у [2]. Розв'язання поставленої у роботі задачі проводилося у рамках уточнених моделей механіки суцільних середовищ з урахуванням впливу обертально-зсувних деформацій за використання методу інтегральних перетворень, що дозволило дослідити вплив динамічного нестационарного навантаження, звівши розв'язання нестационарної задачі до сукупності задач у частотній області [2].

Для числового експерименту використані результати, отримані у [3] для групи двокомпонентних пінополіуретанів з різним співвідношенням спінювача та поліуретану. Величини мікроструктурних характеристик пінополіуретанів визначалися на основі симуляційного аналізу, запропонованого у [4].

Отримані числові результати дозволяють оцінити зміну механічної поведінки пінополіуретанів та їх вібропоглинальні властивості за дії навантажень, що спричиняють пластичні деформації.

[1]. Mikulich, O., Furs, T., Shvabyuk, V.: Changes in the Mechanical Characteristics of Polyurethane Foam under Multi-Cycle Loading: Experimental Study, Materials Science Forum 1141, 79–83, 2024.

[2]. Mikulich, O., Shvabyuk, V., Pasternak, I., Andriichuk, O.: Modification of boundary integral equation method for investigation of dynamic stresses for couple stress elasticity, Mechanics Research Communications 91, 107–111, 2018.

[3]. Mikulich, O., Hulay, O., Furs, T., Shemet, V.: Strength and mechanical characteristics of modified polyurethane foams, Procedia Structural Integrity 59, 460–465, 2024.

[4]. Mikulich, O.: Method of Assessing the Optimality of the Mechanical Characteristics of Foams. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 477–484, 2024.

MODELING THE EFFECT OF REPLICATE LOADS WITH PLASTIC DEFORMATIONS IN FOAM MATERIALS

The paper modelled the effect of replicated loads that cause plastic deformations in foam materials on the change in the mechanical behaviour of the corresponding bodies. The obtained numerical results allow for the evaluation of the change in the mechanical behaviour of polyurethane foams and their vibration-absorbing properties under the action of loads that cause plastic deformations.

УДК 614.841.332

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Пурденко Р.Р., Ковальов А.І., д.т.н., с.н.с., Дrajніков Д.С.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

У зв'язку зі змінами у світовому безпековому середовищі під час повномасштабного вторгнення російської федерації на територію нашої держави, яка з 2014 року переживає безперервне знищення об'єктів цивільної та соціальної інфраструктури, а також житлового фонду, країна стоїть перед величезним завданням відновлення. В умовах повоєнної відбудови об'єктів критичної інфраструктури та інших об'єктів після поновлення будівництва

таких об'єктів та розробки нових проєктів на будівництво виникатимуть питання, пов'язані з розташуванням в просторі таких недобудов протипожежних відсіків, які не були закладені в попередніх проєктах. Відповідно виникне і на даний час вже виникає потреба у підвищенні меж вогнестійкості будівельних конструкцій до нормованих значень, а також захисту наявних конструкцій від впливу вогню. Завдання забезпечення необхідних меж вогнестійкості розглянутих будівельних конструкцій є вельми актуальним. Розв'язання цього завдання сприятиме підвищенню рівня пожежної безпеки будівельних об'єктів та створить умови для правильного оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій при різних умовах роботи та різних впливах. А це, своєю чергою, позитивним чином вплине на основні показники пожежної статистики

В рамках реалізації завдання було розроблено математичну модель та удосконалено метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій, розглянуто алгоритм застосування розробленого методу, надано опис процедур його реалізації.

Особливістю розробленої математичної моделі є той факт, що межа вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій, в якості якої виступав час, що відповідає нормованій межі вогнестійкості $t_{fi,requ}$ з урахуванням товщини, коефіцієнту теплопровідності та густини покриття в останньому визначався за емпіричним рівнянням. Для уточнення діапазону технологічних параметрів покриття (товщини, коефіцієнту теплопровідності та густину) за яких досягаються найраціональніші значення показників часу вогнестійкості, було використано метод планування багатофакторного експерименту.

За відгук обиралася межа вогнестійкості сталі ($t_{fi,requ}$, хв) за умови, що цей час прагне до максимуму. Незалежними змінними (факторами) були обрані: X_1 – товщина покриття (d_p), X_2 – коефіцієнт теплопровідності покриття (λ_p), X_3 – густина покриття (ρ_p) (табл. 1).

Таблиця 1 Експериментальні рівні варіювання

Фактори оптимізації	Кодоване значення факторів	Інтервал варіювання	Рівні факторів		
			верхній R90	основний R60	нижній R30
Товщина покриття, d_p , мм	X_1	0,895	2	1,105	0,21
Коефіцієнт теплопровідності покриття, λ_p , мВт/(м·°C)	X_2	48,1	100	51,9	3,8
Густина покриття, ρ_p , кг/м ³	X_3	150	1400	1250	1100

При отриманні рівняння регресії враховувалися фізична незалежність вхідних та вихідних параметрів, нормальність розподілу випадкових результатів, стійкість експерименту до перешкод, а порядок виконання досліджень не порушував ортогональність плану.

В результаті складено план трьохфакторного експерименту, за яким використовуючи методи статистичного планування n -го порядку, математична модель була отримана у вигляді нелінійного рівняння регресії квадратичної форми для трьох факторів оптимізації.

Для виключення систематичної похибки досліди рандомізовано за допомогою таблиці випадкових чисел. На основному рівні проведено $m = 3$ паралельних експериментів у $n = 5$ повтореннях кожен (загальна кількість спостережень $N = 3 \cdot 5 = 15$), на основі яких встановлено число ступенів свободи ($k_0 = N - 1 = 4$ (для загальної суми квадратів відхилень); $k_1 = m - 1 = 2$ (для міжгрупової суми квадратів відхилень); $k_2 = m(n - 1) = 12$ (для внутрішньогрупової суми квадратів відхилень) дисперсію досліду при двох ступенях свободи $S_c^2 = 499,9$ та середнє квадратичне відхилення $\sigma_c = 22,358$.

За даними експерименту та з використанням методу планування багатфакторного експерименту розраховано коефіцієнти регресії (у кодованому масштабі):

$$\begin{array}{llll} b_0 = 69,45 & b_{11} = 0,01312 & b_{22} = 0,0014 & b_{33} = -0,000036 \\ b_1 = 0,448 & b_{12} = -0,14 & b_{23} = 0,000662 & \\ b_2 = -0,000115 & & b_{13} = 0,00466 & \\ b_3 = -0,000023 & & & \end{array}$$

Табличне значення t -критерію Стьюдента при 15 дослідках та рівні значимості 0,05 складає 2,14. Отримана модель залежності відносно похибки проведення контролю від трьох визначених факторів має вигляд:

$$t_{fi,regu} = 69,45 + 0,448 \cdot d_p - 0,000115 \cdot \lambda_p - 0,000023 \cdot \rho_p + 0,01312 \cdot d_p^2 + 0,0014 \cdot \lambda_p^2 - 0,000036 \cdot \rho_p^2 - 0,14 \cdot d_p \cdot \lambda_p + 0,00466 \cdot d_p \cdot \rho_p + 0,000662 \cdot \lambda_p \cdot \rho_p \quad (1)$$

В результаті дослідження вищенаведеного рівняння регресії були встановлені залежності нормованої межі вогнестійкості сталі ($t_{fi,regu}$) від коефіцієнту теплопровідності покриття (λ_p), густини покриття (ρ_p) за різних значень товщини покриття (d_p) (рис.1).

Як можна побачити із залежностей (рис. 1) при значеннях товщини покриття, що прямує до мінімуму, при одночасному зменшенні густини від 1400 кг/м³ до 1250 кг/м³ і при постійному значенні коефіцієнту теплопровідності 3,8 мВт/(м·°C), значення межі вогнестійкості вогнезахищеної сталеві конструкції знаходяться за межами робочих параметрів. Вихід за рамки цього діапазону під час обрання робочих параметрів веде до похибок при оцінюванні вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій.

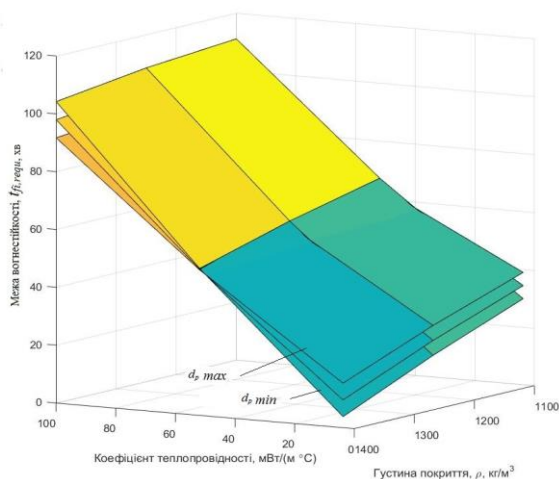


Рис. 1. Поверхні залежностей межі вогнестійкості вогнезахищеної сталевій конструкції від коефіцієнту теплопровідності покриття, густини покриття за різних значень товщини покриття

При зменшенні товщини покриття менше 1,105 мм, з одночасним збільшенням його густини вище 1250 кг/м³ та теплопровідності вище 3,8 мВт/(м·°C), межа вогнестійкості сталі досягає мінімальних значень $t_{fi,requ} < 50$ хв. В той же час, збільшення товщини покриття більше 1,105 мм при одночасному зменшенні його густини та зменшенні теплопровідності веде до підвищення межі вогнестійкості сталі за найбільш раціональних режимів до 60 хвилин.

Таким чином, на основі проведеного експериментально-статистичного дослідження методом планування багатофакторного експерименту та аналізуючи отримані залежності (рис.1), уточнено раціональні діапазони технологічних параметрів покриття (товщини, коефіцієнту теплопровідності та густину), за яких час вогнестійкості набуває найбільших значень.

На основі математичної моделі розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій, що передбачає такі етапи (рис. 1):

1. Проведення випробувань на вогнестійкість вогнезахищених сталевих конструкцій або експериментів з визначення температури необігрівної поверхні зменшених зразків вогнезахищених сталевих конструкцій при визначених умовах випробувань (температурні режими пожежі: стандартної,

вуглеводневої, зовнішньої, тунельної, реальної) залежно від умов експлуатації вогнезахисної конструкції [1].

2. Побудова математичної, моделі процесів, що відбуваються у досліджуваній вогнезахисній сталевій конструкції при випробуванні на вогнестійкість у визначених умовах випробувань [2]. Комп'ютерна реалізація розробленої математичної моделі.

3. На основі отриманих в результаті випробувань на вогнестійкість даних (температури в печі, температури на зразках конструкції, що випробовуються), визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття (коефіцієнт теплопровідності, питома об'ємна теплоємність) шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності [3].

4. Визначення залежності мінімальної товщини покриття від приведеної товщини сталеві конструкції, тривалості вогневого впливу та значення критичної температури сталі, шляхом розв'язання прямих задач теплопровідності [3].

[1]. Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Качкар Є.В., Майборода Р.І. Оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих балок. Вісті Донецького гірничого інституту. Донецьк: ДВНЗ «ДНТУ». 2022. № 2 (51). С.43–53.

[2]. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Пурденко Р.Р., Томенко В.І. Дослідження вогнестійкості захищених реактивними вогнезахисними речовинами сталевих будівельних конструкцій. Пожежна безпека. Львів: ЛДУБЖД. 2022. № 41. С.57–66.

[3]. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER. 2021. 180 p.

CALCULATION-EXPERIMENTAL METHOD ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE OF FIRE-PROTECTED STEEL STRUCTURES

A mathematical model and method for assessing the fire resistance of fire-protected steel structures have been developed, an algorithm for applying the developed method has been considered, and a description of the procedures for its implementation has been provided.

УДК 624.014.2:624.072:624.014.046

ЛІНІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБПИРАННЯ ПЕРФОРОВАНИХ БАЛОК НА ОГОЛОВКИ КОЛОН

**Безнюк Л.І., аспірант, Романюк Є.В., аспірант,
Романюк В.В., к.т.н., доцент, Супрунюк В.В., к.т.н., доцент,
Зятюк Ю.Ю., к.т.н., доцент**

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

Як відомо, розрахунок будівельних конструкцій з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) ґрунтується на представленні пружних систем у вигляді набору елементів з кінцевим числом ступенів свободи, які з'єднуються між собою у вузлових точках (вузлах). Тобто метод скінченних елементів заснований на представленні суцільного тіла у вигляді сукупності окремих скінченних елементів, що взаємодіють між собою в кінцевому числі точок, які в МСЕ прийнято називати вузлами [1,2].

Таке представлення заданої системи призводить до повної формалізації всіх етапів розрахунку, причому загальний підхід до вирішення конкретних завдань є єдиним як для стержневих систем, так і для пластин, оболонок, об'ємних тіл тощо [1,2].

Метод скінченних елементів покладено в основу програмного комплексу для статичного та конструктивного розрахунків ЛІРА-САПР (надалі LIRA-FEM), у якому він реалізований у формі переміщень, тобто він застосовується для випадків, коли вирішальною шуканою функцією є переміщення. Це обумовлено тим, що вибір розрахункової схеми для МСЕ в переміщеннях легко піддається алгоритмізації, а практичне використання МСЕ неможливе без застосування сучасних комп'ютерів [1,2].

Бібліотека скінченних елементів (БСЕ) містить елементи, що моделюють роботу різних типів конструкцій: елементи стержнів, чотирикутні та трикутні елементи плоскої задачі, плити, оболонки, елементи просторової задачі – тетраедр, паралелепіпед, тригранна призма. Крім того, у БСЕ є різні спеціальні елементи, що моделюють в'язь скінченної жорсткості, пружну податливість між вузлами, елементи, що задаються чисельною матрицею жорсткості [1,2].

Лінійне моделювання ґрунтується на таких принципах:

- вважається, що закон Гука зберігається на всій ділянці роботи конструкції від початку її навантаження і закінчуючи руйнуванням;
- під час роботи конструкції за дії навантаження виникають лише малі деформації;

– в основу роботи конструкції покладено принцип незалежності дії сил.

При цьому: матеріал характеризується лінійними пружними властивостями, які визначаються за формулами опору матеріалів; граничні умови під час розрахунку залишаються незмінними; послідовність прикладання навантаження є несуттєвим фактором, що не впливає на результат розрахунку; зміни геометрії через деформації вважаються малими і їх не враховують під час перевірки рівноваги.

Деякі аспекти розрахунку та конструювання перфорованих елементів наведено у [3, 4, 5, 6].

Під час лінійного розрахунку моделювання перфорованої двопрольотної нерозрізної балки здійснено з використанням спрощеної розрахункової схеми, яка максимально наближена до реальної роботи конструкції.

Моделювання розрахункової схеми балки для лінійного розрахунку виконується у кілька етапів.

1-й етап – «Створення нової задачі».

1. Для створення нової задачі необхідно відкрити меню програми LIRA-FEM і обрати пункт Новий (створити новий документ).

2. У діалоговому вікні обрати ознаки схеми 5 – Шість ступенів свободи у вузлі (X, Y, Z, U_x, U_y, U_z). З цією ознакою схеми можна виконувати розрахунок просторових каркасів, оболонок, допускається включення об'ємних тіл, урахування пружної основи тощо.

2-й етап – «Створення геометричної схеми».

Моделювання сітки скінченних елементів двотаврів виконано по осевих лініях полиці та стінки за допомогою пластин (рис. 1), причому скінченні елементи біля шестикутних отворів сформовано три- та чотири-вузловими пластинами. Прийняті розміри та форми скінченних елементів дозволяють отримати високу точність розрахунку. Для двотаврових балок залежно від висоти вихідного профілю прийнято такі розміри: для стінки 25x25; 25x23,05; 25x19,9; 25x18,5; 25x17,4; 25x16,1 мм; для полиці 25x33,75; 25x26; 25x25,5; 50x42,5; 50x50; 50x45 мм.

Після створення геометричної схеми обов'язково необхідно виконати «Упаковку схеми». Наступним важливим моментом є співпрямовання власних місцевих осей пластин з глобальними осями моделі.

3-й етап – «Формулювання граничних умов».

Кріплення кінців перфорованої двопрольотної балки з однаковими за величиною прольотами $l = 6$ м прийнято таким: крайня опора зліва – шарнірно нерухома; крайня опора справа – шарнірно рухома; проміжна опора – шарнірно рухома у вигляді примикаючого шарніра. Для кріплення балки з площини дії навантаження використано поперечні елементи, які розміщено по верхніх поясах двотаврових профілів з кроком 1 м.

4-й етап – «Завдання жорсткісних параметрів».

Для розрахунку необхідно задати жорсткісні параметри елементів, кількість яких залежить від конкретного типу скінченного елемента. До таких параметрів належать: модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, товщини полиці та стінки, густина матеріалу. Вихідні параметри товщин стінки та полиці наведено в табл. 3.

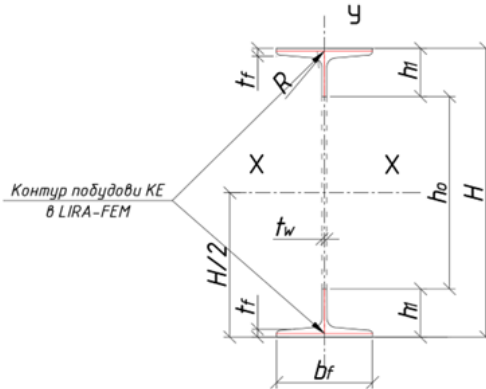


Рис. 1. Схема побудови скінченних елементів в ПК LIRA-FEM

5-й етап – «Завдання навантажень».

Навантаження прийняті рівномірно розподіленими і такими, що прикладені до верхнього поясу балки. Величини навантажень обчислено за граничними станами двох груп: із умови забезпечення несучої здатності за міцністю та прогинами: розрахункові навантаження $q_{Q_{max}}$ обчислене за величиною максимальної поперечної сили; $q_{M_{max}}$ обчислене за величиною максимального згинаючого моменту; q_{II} обчислене за величиною граничного прогину. Для подальших розрахунків навантаження переведено з кН/м в кН/м², оскільки моделювання балки виконується пластинами.

6-й етап – «Повний розрахунок схеми».

Виконується повний розрахунок задачі із заданими параметрами.

7-й етап – «Перегляд і аналіз результатів статичного розрахунку».

Після розрахунку задачі аналіз та перегляд результатів реалізується на вкладці «Аналіз».

За наведеною вище методикою визначено напружено-деформований стан перфорованих балок, вихідними профілями для яких є І20, 30, 40, 50, 60/ДСТУ 8768:2018, у місці розміщення проміжної опори у разі обпирання їх на горизонтальні плити оголовків колон і кріплення до них болтами.

З досвіду великої кількості раніше виконаних розрахунків аналіз напружено-деформованого стану може здійснюватись як за допомогою мозаїчних зображень, так і за допомогою ізополів. Мозаїка показує розподіл напружень у центрі ваги пластини, що є результатом обчислень процесора. Ізополя – це інтерпретація результату і для їх побудови необхідно додати точки значень у вузлах залежно від напружень у КЕ, які прилягають до вузла, та від їхнього центру ваги до вузла. У підсумку максимальні значення напружень у вигляді мозаїк та ізополів можуть відрізнитись. Особливо це стосується місць обпирання перекриттів на нижче розташовані конструкції, тому що напруження у їх спільному вузлі мають середнє значення. Ізополя зазвичай застосовують для поверхонь, де чітка переважно трикутна. Напруження через різне положення центрів ваги пластин не дуже відрізняються і тому результати краще аналізувати. Мозаїку необхідно використовувати для візуалізації фактично отриманих значень, а ізополя та ізолінії для оцінювання характеру змін того чи іншого фактору по площі групи скінченних елементів.

[1]. <https://www.liraland.ua/solutions/functionality/fem.php>. [2]. <https://help.liraland.com/uk-ua/high-technology-innovations/nonlinearity-in-lira-sapr.html>. [3]. DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktysii. Normy proektuvannya [Chynnyy vid 2015-01-01]. Kyiv :Minrehion Ukrainy, 2014. 198 s. (Derzhavni budivel'ni normy Ukrainy). [4]. Volodymyr Romaniuk, Leonid Bezniuk, Volodymyr Supruniuk, Oleksandr Kononchuk, Olga Meshcheryakova, Andrii Sorochak. Features of the work of continuous perforated beams near intermediate supports. *Procedia Structural Integrity*. Volume 59, 2024, Pages 471-478. [https://authors.elsevier.com/sd/article/S2452-3216\(24\)00383-4](https://authors.elsevier.com/sd/article/S2452-3216(24)00383-4) [5]. Романюк В.В., Супрунюк В.В. Експериментальні дослідження прольотних конструкцій з перфорованих елементів за складного напружено-деформованого стану. *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник*. К.: КНУБА, 2019. Випуск 103. С. 189 – 200. <http://opir.knuba.edu.ua> [6]. Volodymyr Romaniuk, Volodymyr Supruniuk, Leonid Bezniuk, Oleksandr Kononchuk, Olga Meshcheryakova, Andrii Sorochak. Experimental studies of a steel rafter arch with a perforated upper band. *Procedia Structural Integrity*. Volume 59, 2024, Pages 479-486. [https://authors.elsevier.com/sd/article/S2452-3216\(24\)00384-6](https://authors.elsevier.com/sd/article/S2452-3216(24)00384-6)

LINEAR MODELING OF SUPPORTING PERFORATED BEAMS ON COLUMN HEADS

Linear modeling is based on the following principles: it is believed that Hooke's law is preserved throughout the entire section of the structure's operation from the beginning of its loading to its failure; during the operation of the structure, only small deformations occur under the action of the load; the operation of the structure is based on the principle of

independence of the action of forces. The modeling of a perforated two-span continuous beam was carried out using a simplified calculation scheme, which is as close as possible to the real operation of the structure. The main stages of such modeling are: creating a new problem, where the features of the scheme are specified; creating a geometric scheme, in which the shapes and dimensions of finite elements are adopted; forming boundary conditions for fastening the ends of the beam to the supports; setting stiffness parameters with values of elastic modulus, Poisson's ratio, shelf and wall thickness, material density; setting design loads for limit states of the 1st and 2nd groups; calculation of the scheme and analysis of the results obtained. Using the above method, the stress-strain state of perforated beams, the initial profiles for which are 20, 30, 40, 50, 60/DSTU 8768:2018, was determined at the location of the intermediate support in the case of their support on the horizontal plates of the column heads and fastening to them with bolts.

УДК 624.012.35:620.173/174

ЗАЛЕЖНІСТЬ ПРУЖНОПЛАСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТИСНУТОГО БЕТОНУ ВІД ШВИДКОСТІ ЙОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Ромашко-Майстрок О.В., к.т.н., Ромашко В.М., д.т.н., проф.

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне
romashkoolena@gmail.com, romashkovasyvl@gmail.com

Одною з основних особливостей деформування бетону є те, що зі зростанням навантаження відбувається нелінійне накопичення його пластичних деформацій. Зазначена нелінійність безпосередньо залежить від швидкості деформування бетону або швидкості прикладання силового навантаження. Чим вищою є швидкість прикладання силового навантаження або деформування бетону, тим меншою є величина пластичних деформацій бетону і навпаки. Пояснення подібної закономірності є дуже простим: швидкість та тривалість деформування бетону, як і швидкість та тривалість прикладання силового навантаження, - величини обернено пропорційні. Саме тому за тривалої дії навантажень пластичні

деформації бетону мають змогу проявитися в найбільшій мірі. Водночас зростання пластичних деформацій бетону веде до зменшення його міцності. Тоді виникає питання, що є особливо актуальним для проектування залізобетонних елементів і конструкцій: яким чином можна спрогнозувати взаємну зміну міцнісних та деформаційних характеристик бетону при зміні швидкості чи тривалості прикладання силового навантаження?

Для встановлення зазначеного зв'язку між вищезгаданими статичними характеристиками стиснутого бетону з нестатичними (динамічними чи тривалими) доцільно використати загальновідому гіпотезу незмінності та незалежності від режиму завантаження питомої потенціальної енергії граничного деформування (руйнування) бетону [1].

Одним із загальновизнаних інтегральних параметрів, що дозволяють характеризувати пластичні властивості стиснутого бетону за дії статичних навантажень, є коефіцієнт його пружно-пластичності

$$k = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1} / f_{ck} = E_{co} / E_{cf} , \quad (1)$$

де E_{co} – початковий модуль пружності бетону при $\sigma_c = 0$; f_{ck} , ε_{c1} і E_{cf} – міцність стиснутого бетону, відповідні їй критичні деформації бетону і модуль деформацій бетону за дії стандартизованих статичних навантажень.

Дані вишукування спрямовувались на вивчення закономірностей зміни цього коефіцієнта за різних швидкостей деформування бетону. Завдяки проведеним дослідженням, було встановлено функціональний зв'язок між коефіцієнтами пружно-пластичних властивостей бетону за дії статичних та динамічних навантажень при швидкості його деформування в діапазоні $10^{-6} \text{ c}^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 10^3 \text{ c}^{-1}$

$$k_d = 1 + (k - 1) \cdot (\log(\dot{\varepsilon}_m / \dot{\varepsilon}) / 9) + k / 5 \cdot (9 - \log(\dot{\varepsilon}_m / \dot{\varepsilon})) \cdot (\log(\dot{\varepsilon}_m / \dot{\varepsilon}) / 18)^2 , \quad (2)$$

де $\dot{\varepsilon}_m$ – швидкість деформування стиснутого бетону за дії миттєвого динамічного навантаження, обмежена величиною

$$\varepsilon_m = 10^3 c^{-1}.$$

Також було становлено, що в діапазоні швидкостей деформування стиснутого бетону $\varepsilon < 10^{-6} c^{-1}$ аналогічний взаємозв'язок між коефіцієнтами його пружно-пластичності за дії тривалих та за дії статичних навантажень можна відобразити наступною залежністю

$$k_l = k^{\log(\varepsilon_m / \varepsilon) / 8,5}. \quad (3)$$

Тоді рівень деформативності стиснутого бетону за дії будь-яких навантажень можна прогнозувати за загальним виразом

$$\varepsilon_{c1,epl} / \varepsilon_{c1} = f_{ck,epl} / f_{ck} \cdot k_{epl} / k, \quad (4)$$

де $f_{ck,epl}$, $\varepsilon_{c1,epl}$ та k_{epl} - міцність стиснутого бетону, відповідні їй критичні деформації бетону та коефіцієнт пружно-пластичності бетону за дії будь-яких навантажень [2, 3].

- [1] Romashko V., Romashko-Maistruk O. Strength resource calculation of the reinforced concrete elements according to the energy criterion. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 269-276.
- [2] Romashko-Maistruk O., Romashko V. Model of concrete deformation under the action of dynamic loads. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. P. 352-359.
- [3] Ромашко-Майструк О. В., Ромашко В. М. Моделювання діаграми напруження-деформації стиснутого бетону за дії довготривалих навантажень. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне: НУВГП, 2024. Вип. 46. С. 275-282.

DEPENDENCE OF THE ELASTOPLASTIC PROPERTIES OF COMPRESSED CONCRETE ON THE STRAIN RATE OF ITS

The article is devoted to the determination of the main physical and mechanical characteristics of compressed concrete at different strain rates of its. A critical analysis of scientific works on the outlined topic is performed. A method for predicting the main strength and deformation characteristics of compressed concrete in the widest range of its loading rates is proposed: from instantaneous dynamic to long-term with the maximum possible development of creep deformations.

УДК 624.012.25: 536.24: 517.9

НЕСТАЦІОНАРНА НЕЛІНІЙНА ЗАДАЧА ВОЛОГОПЕРЕНОСУ В ПОРИСТИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛАХ

**Рябчиков М.Л.¹, Александров О.В.², Александров М.О.²
Сичов Ю.І.²**

¹Львівський національний технічний університет, Львівська вул., 75, Луцьк, 43018, Україна

²Харківський національний університет ім.В.Н.Каразіна, Університетська вулиця, 16, Харків,
61003, Україна

Дослідження стану питання.

Визначення проникнення рідини особливо актуально для пористих будівельних матеріалів, які широко використовуються в будівництві та інших, які піддаються впливу вологи.

Актуальність розробки математичної моделі транспорту рідини через пористі будівельні матеріали зумовлена кількома науковими проблемами, практичними та економічними факторами. Проникнення води або вологи в конструкційні матеріали викликає деградацію, корозію арматури, розтріскування, втрату теплоізоляційних властивостей [1]. Математична модель дозволяє передбачити поведінку матеріалу під впливом вологи ще на етапі проектування. Завдяки моделюванню можна розробляти нові матеріали з оптимальною пористістю для зменшення водопоглинання [2]. Така модель дозволяє здешевити лабораторні дослідження, частково замінивши їх комп'ютерним аналізом. Волога знижує теплоізоляційні властивості матеріалів, що призводить до збільшення енерговитрат [3].

Розробка математичної моделі транспорту рідини через пористість будівельних матеріалів є необхідною умовою підвищення ефективності, безпеки та економічності будівництва. Це дозволяє здійснювати комплексну оцінку якості матеріалів, прогнозувати ризики та впроваджувати інноваційні технології в будівництві та обслуговуванні будівель.

Проникнення рідин крізь пористість матеріалів зазвичай пов'язують з дифузійними процесами [4]. Дифузійні процеси в будівельних матеріалах є предметом активних досліджень [5] у зв'язку з їх значним впливом на довговічність.

Мета даного дослідження – побудувати математичну модель проникнення вологи крізь пористі будівельні матеріали з врахуванням нелінійних властивостей і нестационарного характеру процесу.

Матеріали та методи

Основні матеріали, які використовуються в будівництві, мають пористу структуру, що визначає їх властивості поглинання вологи. Коефіцієнт дифузії вологи (D) — ефективний коефіцієнт проникності водяної пари або вологи, який залежить від структури, температури і вологості.

Рішення нестационарного рівняння дифузії можна здійснити шляхом розкладання шуканої функції концентрації рідини в певні функціональні ряди. У багатьох практичних задачах, зокрема в будівельній фізиці, коефіцієнт дифузії D не є постійною величиною, а залежить від концентрації речовини, що дифундує. Ця залежність враховується в тих випадках, коли концентрація змінюється в широкому діапазоні, відбувається насичення або ущільнення матеріалу, або матеріал має неоднорідну або змінну пористість.

Більш універсальною моделлю була б степенева функція для коефіцієнта дифузії.

$$D(c) = D_0 \cdot c^n \quad (1)$$

де n – коефіцієнт нелінійності ($0 < n < 2$).

Визначення чисельних показників дифузії

Для подальших розрахунків була обрана степенева форма залежності коефіцієнта дифузії у вигляді (1). Процес логарифмування перетворює вираз у лінійну форму

$$\ln D = \ln D_0 + n \cdot \ln c. \quad (2)$$

Використання методу найменших квадратів дозволяє знайти індекси дифузії в явному вигляді.

Результати апроксимації методом найменших квадратів наведено в таблиці.

Таблиця. Значення параметрів дифузії з урахуванням залежності від концентрації

Матеріал	$D_0, \text{мм}^2/\text{с} \times 10^{-4}$	n
Цегла	4,89	1,18
Штукатурка	70,4	1,29
Гіпсокартон	44,2	1,48

Знайдені параметри дифузії в подальшому можуть бути використані при побудові математичної моделі проникнення вологи в будівельні матеріали.

Рішення стаціонарної задачі розподілу вологи в матеріалі.

Рівняння дифузії рідини через матеріал у загальному вигляді можна записати як

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D(C) \frac{\partial C}{\partial x}. \quad (3)$$

В умовах степеневої залежності у вигляді (1) рівняння можна переписати, як

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \cdot C^{n-1} \left(n \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)^2 + C \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right). \quad (4)$$

Це рівняння може бути розв'язано у формі

$$C = K1 \cdot (x + x_0)^{1/n+1}. \quad (5)$$

Константи інтегрування повинні бути знайдені з граничних умов. Для цього зручно вибрати початок координат у точці досягнення рідини. Напрямок осі вибирають у напрямку вільної поверхні. Тоді для $x=0$, $C=0$ для $x=s$, $C=0$.

Ці умови забезпечують рішення у формі

$$C = \left(\frac{x}{s} \right)^{1/n+1}. \quad (6)$$

Нестационарна проблема розповсюдження вологи в матеріалі

Розв'язок нестационарної задачі представлений у вигляді $C(x,t) \cdot t^{-\alpha} f(\xi)$, де

$$\xi = \frac{x}{t^\beta}.$$

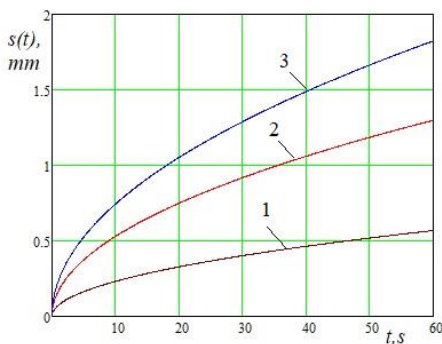


Рис.1 Зростання змоченої зони в матеріалі 1 – цегла, 2 – гіпсокартон, 3 – штукатурка

Для знаходження коефіцієнтів α і β , необхідно підставити пропоновані вирази в рівняння.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\alpha t^{-\alpha-1} f(\xi) - \beta t^{-\alpha-1} \xi f'(\xi), \quad (7)$$

Кінцева форма розв'язку буде мати вигляд:

$$C(x, t) = \left[1 - \frac{\beta n^2}{4D_0 t^{n\alpha}} \left(\frac{x}{t^\beta} \right)^2 \right]_+^{1/n}. \quad (8)$$

де [...] + означає лише позитивні значення.

Еволюція профілю концентрації в часі для $n=1,48$ має вигляд рис. 1.

Отриманий вираз дозволяє передбачити відстань у будівельному матеріалі, до якої за певний час досягне волога. З іншого боку, можна обмежити час перебування у вологому стані з умови досягнення певної граничної відстані. Також можна вибрати дифузійні характеристики будівельного матеріалу з умови обмеження швидкості проникнення рідини в матеріал.

[1] J.M.P.Q.Delgado, V.P. de Freitas, A.S. Guimarães, Water movement in building walls: interfaces influence on the moisture flux, *Heat Mass Transfer*, 52 (2016) 2415–2422. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1755-z>.

[2] H.V.Andersen, M.Morelli, T.K.Hansen, R.Peuhkuri In-situ characterization of the relative humidity at the surface of building materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 2654(1) (2023) 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2654/1/012043>.

[3] M.Campanale, L.Moro, Thermal Conductivity of Moist Autoclaved Aerated Concrete: Experimental Comparison Between Heat Flow Method (HFM) and Transient Plane Source Technique (TPS). *Transp Porous Med* 113, (2016) 345–355. <https://doi.org/10.1007/s11242-016-0697-8>.

[4] Y.Li, D.Luo, Liquid-Water Transfer Coefficients of Porous Building Materials Under High-Humidity Conditions. *Buildings*, 14(12), (2024) 3865. <https://doi.org/10.3390/buildings14123865>.

[5] D.M. Degefu, Z.Liao, U.Berardi, G.Labbé, I.Akhmetova, Geopolymer concrete for net-zero buildings: Correlating paste chemistry with monolith hygrothermal performance, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 189 (2023) 106743, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106743>. <https://doi.org/10.1063/1.5043730>.

NON-STATIONARY NONLINEAR MOISTURE TRANSFER PROBLEM IN POROUS BUILDING MATERIALS

The process of liquid penetration into porous building materials has been studied. The effect of moisture on the durability, thermal insulation properties and structural integrity of

materials has been studied. The relevance of developing mathematical models for predicting moisture ingress into structures has been noted, as this allows minimizing operating costs and increasing the energy efficiency of buildings. A nonlinear diffusion model has been proposed that takes into account the dependence of the diffusion coefficient on moisture concentration. Experimental data have been approximated and model parameters have been determined for specific materials. Both stationary and nonstationary moisture transfer problems are considered, analytical solutions and a methodology for their application for predicting the depth of moisture penetration are presented. The results can be integrated into BIM systems, opening up new prospects for use in digital construction.

УДК 519.6: 539.3

ЯВИЩЕ ТЕРМІЧНОЇ РЕКТИФІКАЦІЇ У БІМАТЕРІАЛІ З ТЕПЛОПРОВІДНИМ ТРІЩИНОВАТИМ ІНТЕРФЕЙСОМ

Середницька Х.І., к.ф.-м.н., зав. лабораторії

Інститут прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів

В даному повідомленні вивчено явище термічної ректифікації для біматеріалу, на міжфазній (інтерфейсній) лінії якого розташована періодична система теплопровідних тріщин під дією термомеханічного навантаження.

Розглянемо біматеріал, який складається з різних ізотропних матеріалів D_1 і D_2 , які характеризуються різними термомеханічними властивостями. На лінії з'єднання (інтерфейсі) матеріалів розташована періодична система тріщин довжиною a і періодом розташування d (рис. 1). На нескінченності біматеріал підданий дії рівномірно розподілених розтягувальних і зсувних зусиль p , S_1 , S_2 відповідно та стаціонарного однорідного теплового потоку q . Розкриті під дією навантаження тріщини заповнюються газом, що проникає у порожнину із зовнішнього середовища чи матеріалу композиту дифузійним чи фільтраційним шляхом. Вважаємо, що газ не чинить опору деформуванню тіла і характеризується коефіцієнтом теплопровідності λ .

При передачі тепла і зусиль через міжфазну лінію біматеріалу, відбувається ідеальний механічний і тепловий контакт матеріалів на ділянках відсутності тріщин і неідеальний тепловий контакт в межах зазорів, утворених внаслідок розкриття тріщин. Теплообмін між берегами тріщин моделюється термоопором і поздовжньою теплопровідністю заповнювача тріщин, які змінюються в процесі навантаження. Зауважимо, що періодична система тріщин зумовлює додатковий розподіл температури, який впливає на

контактний термоопір і відповідно нормальні міжфазні напруження в околі країв тріщин.

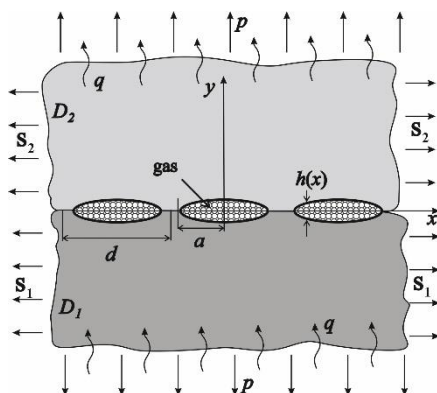


Рис. 1. Схема біматеріалу

Використовуючи метод комплексних потенціалів для задач термопружності для кусково-однорідних тіл з тріщинами сформульовану задачу зведено до нелінійної системи сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь з ядром Гільберта відносно функцій, що мають фізичний зміст стрибка температури між поверхнями тріщин та висоти утворених зазорів. Отриману систему розв'язано за допомогою числово-аналітичних методів [1]. Проаналізовано зміну ефективного міжфазного термоопору біматеріалу в залежності від скерованості теплового потоку і відповідно розподілу температури між двома матеріалами. Зауважимо, що відносна похибка між значеннями термічних опорів для різних напрямів теплового потоку визначає так званий параметр термічної ректифікації, і дає можливість у відсотках проаналізувати вплив зміни температури на нормальні напруження та провідність біматеріалу. Проведено числові розрахунки параметра термічної ректифікації біматеріалу для різних значень густини теплового потоку, розтягувальних зусиль, та коефіцієнта теплопровідності заповнювача тріщин, та щільності розташування тріщин. Встановлено, що збільшення теплопровідності тріщин та розтягувального навантаження приводить до зниження параметра термічної ректифікації, а збільшення густини теплового потоку та щільності розташування тріщин навпаки до зростання параметра термічної ректифікації.

[1]. Мартиняк Р.М., Середницька Х.І. Контактні задачі термопружності для міжфазних тріщин в біматеріальних тілах. – Львів: Растр-7, 2017. – 168 с.

THERMAL RECTIFICATION PHENOMENON IN A BIMATERIAL WITH A HEAT-CONDUCTING CRACKED INTERFACE

Thermal rectification of a bimaterial, on the interface of which there is a periodic system of heat-conducting cracks under the action of thermomechanical loading, is studied. Under the action of tensile loading, gas enters the crack cavities. Heat transfer through the crack surfaces is modeled by the thermal resistance and longitudinal thermal conductivity of the crack filler. The dependence of the thermal rectification parameter on the intensity of tensile forces, the density of the stationary heat flow, and the coefficient of thermal conductivity of the gas are analyzed.

УДК 627.522

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАСІННЯ ХВИЛЬ КОНСТРУКЦІЄЮ ОГОРОДЖУВАЛЬНОЇ СПОРУДИ НЕПОВНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ

Синиця Р. В. к.т.н., доцент, **Осадчий В. С.** к.т.н., доцент,
Дмитрієв С. В. к.т.н., доцент

Одеська державна академія будівництва та архітектури

У практиці будівництва огорожувальних та берегозахисних гідротехнічних споруд застосовуються споруди неповного вертикального профілю (рис. 1), через верхню будову яких, за рахунок зниження позначки надводної будови, допускається частковий перелив гребнів хвиль з подальшою зміною їх основних хвильових параметрів.

У нормативних документах багатьох країн з проєктування гідротехнічних споруд та публікаціях різних дослідників, відсутні науково обґрунтованих практичних рекомендацій, які дозволяли би визначати величину гасіння хвиль спорудами даного типу.

Чисельне моделювання все більш широко використовується з метою дослідження складних фізичних процесів, які будуть спостерігатися при експлуатації реальних об'єктів. Використання чисельних методів, дозволяє суттєво зменшити час, при створенні складних моделей, зменшити фінансові витрати при проведенні досліджень та виконанні доводки (калібровки), конструкцій ОГТС неповного вертикального профілю, що досліджуються.

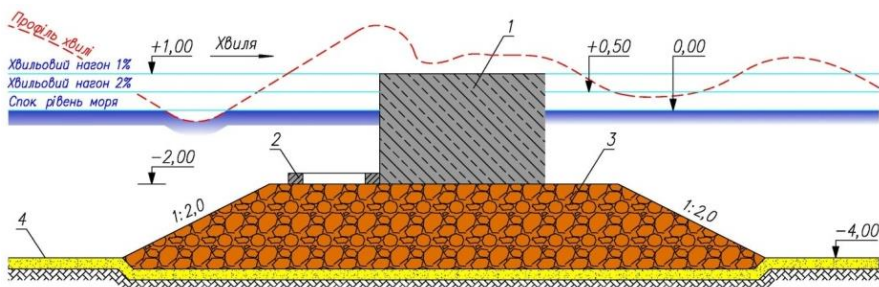


Рис. 1. Конструкція огорожувальної споруди неповного вертикального профілю: 1 – бетонний масив; 2 – бермений масив (щільова плита); 3 – кам'яна постіль

Удосконалення конструкцій гідротехнічних споруд, підвищення їх надійності та зниження собівартості безпосередньо пов'язано з удосконаленням методів інженерних розрахунків. У сучасний час широко використовується у гідродинамічних розрахунках метод VOF (Volume-of-Fluid), який у якості опції маркера використовує об'ємну частину рідини у середині розрахункового об'єму сітки кінцевого елементу.

Допустимі висоти хвиль, які очікуються на майданчиках міської інфраструктури, регламентуються параметрами збереження морських берегів та пляжного матеріалу, недопущенням затоплення прибережних територій у наслідку впливу штормів рідкої повторюваності. У випадках захисту від хвильових дій територій морських портів, допустимі висоти хвиль, рекомендується приймати $\leq 1,2$ (м). Дані умови встановлюються виходячи з умов здійснення швартовних операцій, а також забезпечення у момент контакту суден з відбійними пристроями причальних споруд, нормальної складової швидкості підходу суден к причалам.

У якості прикладу розглянутий проект створення конструкції ОГТС неповного вертикального профілю, передбачувалося розташувати на відстані $L = 200$ (м) від берегової лінії території, що захищається Одеського заводу сільськогосподарського машинобудування. У місці розташування огорожувальної споруди, що проектується, глибина води $d = 4,0$ (м). Побудував лучи рефракції та трансформації хвиль при підході їх до споруди, що проектується, розрахункова висота хвилі становить $h = 2,4$ (м), середня довжина хвилі $\lambda = 24,5$ (м), піднесення верхньої будівлі конструкції ОГТС неповного вертикального профілю відносно спокійного рівня води $\Delta H = +1,0$ (м), ширина верхньої будівлі огорожувальної споруди $B = 4,0$ (м). У відповідності до

проведених розрахунків було встановлено, що з метою збереження від затоплення території заводу, що захищається допустима висота хвилі за спорудою не повинна перевищувати $h_{cr} < 1,5$ (м).

Наведені результати проведеного чисельного експерименту, пов'язаного з встановленням величини гасіння хвиль при переливі їх через верхню будівлю конструкції ОГТС неповного вертикального профілю на акваторію, що захищається, були отримані з метою верифікації результатів проведених фізичних експериментів та підтвердження достовірності метода, призначеного для визначення величин гасіння хвиль конструкціями ОГТС неповного вертикального профілю. Чисельне моделювання було проведено з використанням програмного комплексу ANSYS Fluent. При моделюванні була використана чисельна модель, довжина якої 70 метрів, а висота 9,5 метра.

Проведений аналіз векторів та полів швидкостей переміщення частинок води у хвилі при впливі на конструкцію ОГТС неповного вертикального профілю, з метою встановлення величини гасіння хвиль, був проведений на підставі графічних матеріалів, які були вибірково представлені на рис. 2; 3. На візуалізаціях представлені траєкторії руху хвиль, які сформовані векторами швидкостей переміщень частинок води у місті розташування огорожувальної споруди. Візуалізації були розглянуті через встановлені інтервали часу, які для проведених достовірного аналізу були розглянуті шагом рівним 1 секунді. Прийнята тривалість експерименту становила 21 секунді, що було обумовлено періодом та довжиною розрахункової хвилі, яка була використана у якості граничної умови проведеного чисельного експерименту. Критерієм прийнятого інтервалу часу була, необхідність стабілізування циклічної повторюваності руху профілю хвиль, що наступало після проходження не менш трьох погашених хвиль на акваторію, що захищається.

Результати проведеного чисельного моделювання у момент часу рівний 4 секундам від початку проведення експерименту представлено на рис. 2.

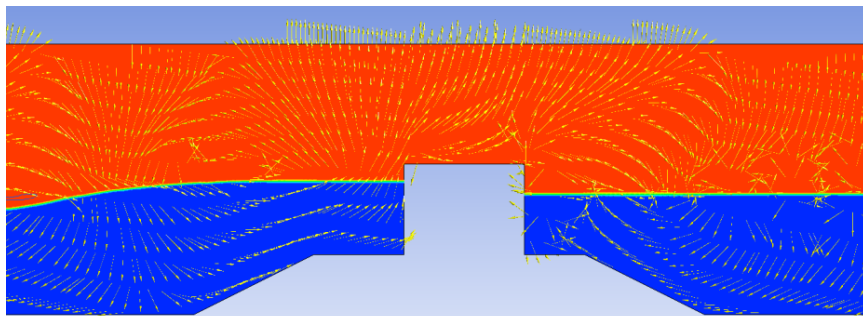


Рис. 2 Вектори руху частинок води у момент часу рівний 4 секундам від початку проведення чисельного експерименту

Результати проведеного чисельного моделювання у момент часу рівний 18 секунд від початку проведення експерименту представлено на рис. 3.

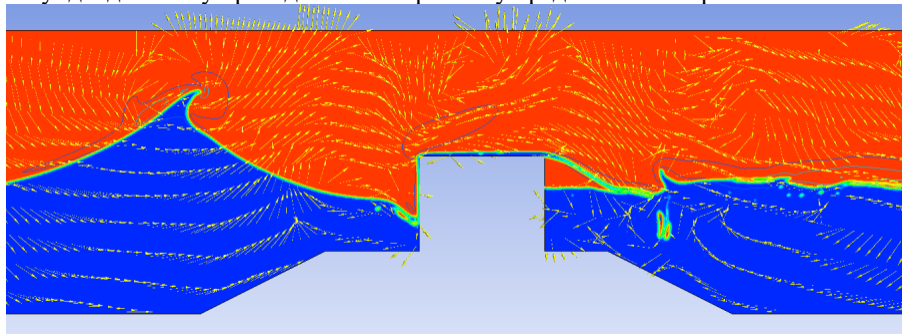


Рис. 3 Вектори руху частинок води у момент часу рівний 18 секундам від початку проведення чисельного експерименту

Представлені результати чисельного моделювання підтверджують достовірність фізичних експериментальних досліджень. При прийнятих вихідних даних, різниця у висотах погашених хвиль, які були отримані при проведенні чисельного моделювання та фізичних експериментів, не перевищують величини 3,3%.

Представлена чисельна модель дозволила більш ретельно оцінити картину фізичних процесів, що спостерігаються з обох сторін моделі конструкції ОГТС неповного вертикального профілю, призначеної для захисту акваторій морських портів, а також елементів берегової інфраструктури морських міст. Використання даної конструкції дозволить зменшити фінансові витрати на величину від 10 до 15% за рахунок зниження позначки надводної будівлі.

1. Осадчий В. С. Определение параметров гашения волн оградительными гидротехническими сооружениями неполного вертикального профиля / В. С. Осадчий, Р. В. Сеница // Вісн. Одеського національного морського університету. Одеса, 2017. Вип №2 (51). С. 108 ÷ 117.
2. Сеница Р. В. Анализ существующих методик определения параметров гашения волн оградительными гидротехническими сооружениями неполного вертикального профиля / Р. В. Сеница, В. С. Осадчий, Л. С. Столяров, А. В. Чернецкий // Вестник гражданских инженеров. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург, 2019. Вып. №1 (72). С. 43 ÷ 55.
3. Synytsia R. V. Experimental studies of the influence of waves on the breakwater of a partial vertical profile / Р. В. Сеница // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. - №80. - Одеса: ОДАБА, 2020. - С. 93 ÷ 102.

NUMERICAL MODELING OF WAVE DAMPING BY THE DESIGN OF A FENCE STRUCTURE WITH AN INCOMPLETE VERTICAL PROFILE

The article describes the issues of numerical experimental research related to the determination of the magnitude of the damping of waves when they overflow through the upper structure of a protective hydraulic structure (PHS) of an incomplete vertical profile. The presented studies were carried out in order to verify the results of physical experimental studies, which were published in [1, 2, 3]. Physical experimental studies were carried out in the hydrowave laboratory of the Hydrotechnical Construction Department of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. As a result of numerical experiments, the height of the damped wave when it overflows through the upper structure of the PHS structure with an incomplete vertical profile onto the protected water area was $h_{tr} = 0,6$ (m). The results of numerical simulation differ by – 3,3%. An empirical dependence designed to determine the magnitude of the damping of waves when they overflow through the upper structure of the PHS structures of an incomplete vertical profile was presented in the publication.

УДК 614.841

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ПОЖЕЖИ НА РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ В СТАЛЕВІЙ БАЛЦІ

Фісінчук І. В., Сідней С.О., к.т.н., доц.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Сталеві конструкції є невід'ємною частиною сучасного будівництва, відіграючи ключову роль у забезпеченні надійності, довговічності та безпеки будівель і споруд. Завдяки поєднанню високої міцності, пружності та технологічності обробки, сталь стала одним із найбільш універсальних будівельних матеріалів, який використовується в усіх типах інженерних систем: від малоповерхових громадських будівель до висотних каркасних хмарочосів та складних промислових об'єктів. Вона демонструє ефективне співвідношення між навантажувальною здатністю та власною масою, що дозволяє значно зменшити загальну масу будівлі та знизити навантаження на фундаменти [1].

Під час проектування необхідно враховувати умови дії екстремальних факторів, які можуть істотно впливати на працездатність конструкцій. До таких факторів належать високі температури внаслідок пожежі, сейсмічні впливи, вибухові навантаження, агресивні хімічні

середовища, багаторазові цикли навантаження тощо [2]. Особливу загрозу становить пожежна небезпека, оскільки навіть при короткочасному тепловому впливі властивості сталі можуть суттєво змінитися, що призводить до швидкої втрати несучої здатності.

Одними з основних елементів, які формують просторову несучу систему будівлі, є сталеві балки. Ці елементи широко застосовуються в конструкціях перекриттів, покриттів, мостів, настилів та інших горизонтальних несучих систем. Вони можуть бути виготовлені як з прокатного, так і з зварного профілю, зокрема з використанням двотаврових перерізів, які забезпечують високу ефективність при згині.

Основною перевагою таких елементів є здатність рівномірно розподіляти навантаження між несучими опорами при мінімальних витратах матеріалу. У проєктних рішеннях для об'єктів з великими відкритими просторами балки дозволяють перекривати значні прольоти без використання додаткових підпірок, що створює умови для гнучкого використання внутрішнього простору [1–3].

Проте, поряд із техніко-економічними перевагами, істотним обмеженням у використанні сталевих балок є їхня висока чутливість до підвищених температур, які виникають унаслідок пожежі. Із зростанням температури відбувається значне зниження механічних характеристик сталі: падає модуль пружності, знижується границя текучості, втрачається жорсткість, що загрожує втраті стійкості та руйнуванню елемента вже при температурах близько 500–600 °C [2, 4]. Якщо вогнезахист не передбачений або є недостатнім, конструкція не здатна витримати нормативний час дії пожежного навантаження, а отже – не відповідає вимогам щодо класу вогнестійкості, що суттєво обмежує можливість її використання у відповідальних будівлях.

У зв'язку з цим виникає потреба у поглибленому вивченні теплової та механічної поведінки сталевих елементів в умовах дії пожежі. Одним із найважливіших аспектів такого аналізу є визначення температурного розподілу у поперечному перерізі балки на різних етапах розвитку пожежі. Саме ці дані формують основу для подальшого визначення моменту втрати несучої здатності, що і є критерієм оцінки вогнестійкості. Точність таких розрахунків значною мірою залежить від коректності вибору температурного сценарію.

На практиці найчастіше застосовується стандартна температура пожежі, що визначається уніфікованою кривою ISO 834. Ця модель не враховує реальні характеристики приміщення, обсяги горючого навантаження, вентиляцію або властивості огорожувальних конструкцій. Вона задає постійне зростання температури з часом і не містить стадії вигорання чи охолодження. Натомість, параметрична пожежа є більш реалістичним

сценарієм, що враховує геометричні, конструктивні й експлуатаційні особливості конкретної будівлі. До розрахункових параметрів входять площа приміщення, висота стелі, коефіцієнти втрат тепла, площа віконних прорізів, щільність пожежного навантаження, тривалість горіння тощо [4, 5].

Багатофакторність дозволяє параметричній пожежі точніше моделювати динаміку температурного впливу на конструкції, включаючи фазу стабілізації, вигорання та охолодження, що відсутні у стандартній кривій ISO 834. Разом із тим, застосування повноцінної параметричної моделі вимагає додаткової кількості вхідних даних, а також виконання додаткових обчислень, що ускладнює її використання в інженерній практиці, особливо на етапі типового проектування.

У зв'язку з цим практичну цінність становить апробація вже розроблених аналітичних залежностей параметричних пожеж, які можна використовувати як універсальні сценарії. Однією з таких моделей є температурна крива, запропонована Carlsson & Pettersson, яка враховує експоненційний характер наростання температури на початковій стадії пожежі та має вигляд:

$$\Theta(t) = 20 + 750 \cdot (1 - e^{-0,2t}), \quad (1)$$

де θ – температура газів у приміщенні, °C; t – час у хвилинах; 20 – початкова температура навколишнього середовища, °C; 750 – гранична температура пожежі, °C; $e^{-0,2t}$ – експоненційне зростання температури.

Для порівняння отриманих результатів під час розв'язання теплотехнічної задачі за параметричною пожежею (1) та стандартним температурним режимом було проведено дослідження розподілу температури в досліджуваній конструкції також в умовах впливу стандартної кривої ISO 834 протягом 1 год, оскільки для таких типів конструкцій найвищий клас вогнестійкості складає R 60.

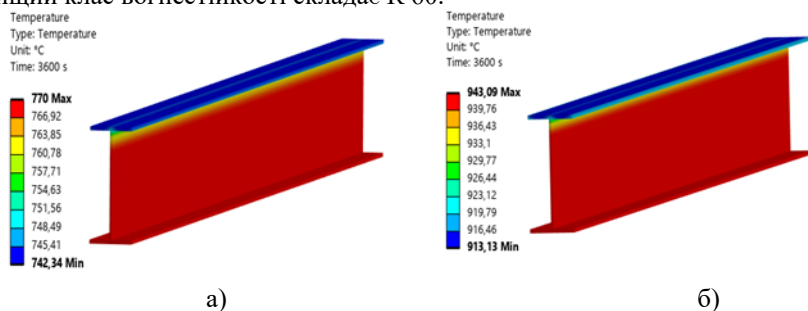


Рис. 1. Розподіл температури по сталевій балці під час теплового впливу протягом 3 600 с: а) – параметричної пожежі (1); б) – стандартного температурного режиму пожежі відповідно ISO 834

На рис. 1 представлений температурний розподіл по сталевій балці в умовах впливу параметричної пожежі (1). За результатами розв'язаної теплотехнічної задачі встановлено, що максимальна температура сталевій балки в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі перевищує значення, отримане під час параметричної пожежі, на 18,3 %. Зокрема, максимальна температура в умовах параметричної пожежі становить 770 °С, тоді як у стандартному температурному режимі – 943,09 °С. Це свідчить про те, що висока температура при стандартному режимі пожежі може спричинити швидшу втрату несучої здатності балки. Під час впливу параметричному режимі спостерігається більш плавний розподіл температури по висоті балки, що відображає реалістичні умови пожежі з фазою затухання. Таким чином, вивчення поведінки сталевих балок під впливом параметричної пожежі має вагоме наукове і прикладне значення. З одного боку, це дозволяє глибше дослідити закономірності формування температурного поля в реальних умовах теплового навантаження. З іншого боку, такі дослідження створюють передумови для вдосконалення нормативної бази, розробки спрощених аналітичних моделей і підвищення ефективності проектних рішень.

- [1]. Добростан О., Новак С., Дрідж В. Вплив параметрів системи вогнезахисту на вогнестійкість сталевих конструкцій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2021. Т. 1. № 11. С. 64–74.
- [2]. Новак С., Новак М. Валідація методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів для сталевих конструкцій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2020. Т. 2 № 10. С. 83–90.
- [3]. Новак С., Добростан О., Пустовий М. Вплив температурного режиму пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2022. Т. 2. № 14. С. 5–20.
- [4]. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Y., ... & Otrosh, Y. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER. 2021. P.180.
- [5]. Guzii, S., Otrosh, Y., Guzii, O., Kovalov, A., & Sotiriadis, K.. Determination of the fire-retardant efficiency of magnesite thermal insulating materials to protect metal structures from fire. Materials Science Forum. 2021. 1038. P. 524-530.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF A PARAMETRIC FIRE ON THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A STEEL BEAM

This study investigates the temperature distribution in a steel beam exposed to a parametric fire scenario compared to the standard ISO 834 fire curve. Using the Carlsson & Pettersson model, the analysis shows that the parametric fire results in a lower maximum temperature and more gradual distribution, reflecting more realistic fire conditions.

УДК 539.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ СІТКИ НА ТОЧНІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОБИТТЯ СТАЛЕВОЇ ПЛАСТИНИ КУЛЕЮ

Сідней С.О., к.т.н., доц.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Забезпечення надійності та безпеки конструкцій, які використовуються у військових, промислових та цивільних об'єктах, є важливим науковим і практичним завданням [1]. Одним із ключових аспектів такого дослідження є аналіз поведінки матеріалів і конструкцій під впливом динамічних ударних навантажень, зокрема проникнення кулі через сталеві пластини. Сучасні підходи до вивчення цієї проблеми активно використовують метод скінченних елементів, який дозволяє моделювати складні процеси з високою точністю. Однак одним із визначальних факторів, що впливають на достовірність результатів моделювання, є параметри скінченно-елементної сітки. Невідповідність розміру елементів, їх геометрії та густоти сітки може призводити до похибок у відображенні напружено-деформованого стану та енергетичних характеристик процесу. Наукові дослідження у цій сфері демонструють високий інтерес до оптимізації параметрів сітки для точного моделювання проникнення кулі. Проте до сьогодні відсутні універсальні рекомендації, які б забезпечували високу достовірність результатів для різних сценаріїв навантаження. Водночас це питання є актуальним для вирішення завдань проектування конструкцій, які мають витримувати динамічні дії, та розробки нових матеріалів із підвищеною стійкістю. У даній роботі розглянуто вплив параметрів скінченно-елементної сітки на достовірність результатів моделювання проникнення кулі сталевій пластині. Представлено аналіз залежності точності результатів від розмірів і форми елементів сітки, що дозволяє вдосконалити методики моделювання та підвищити обґрунтованість інженерних рішень. Для проведення досліджень динамічних процесів пробиття сталевій пластині у моделюванні було використано сталеву пластину товщиною 5 мм та кулю, що відображено на рис. 1. Створення скінченно-елементної сітки та обчислювальні експерименти проведені у модулі Explicit Dynamics ANSYS WB. Було згенеровано 3 типи скінченно-елементних сіток для дослідження динамічних процесів пробиття сталеву пулею. При відтворенні обчислювального експерименту із використанням ударостійкої сталі S-7 застосована модель для опису міцності сталевій пластини Johnson Cook Strength [2, 3].

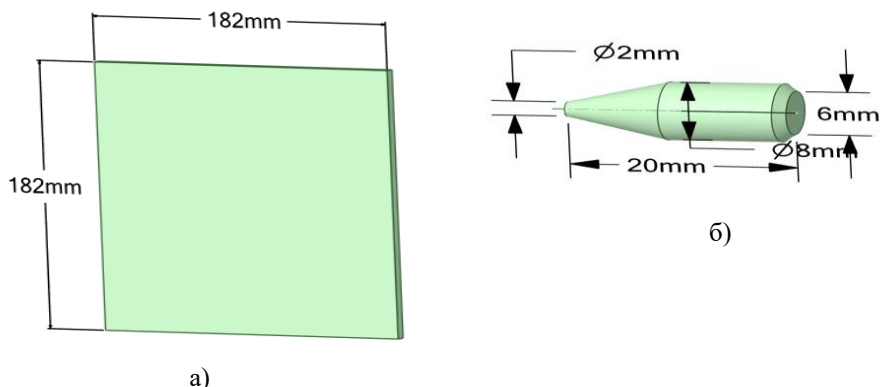


Рис. 1. Зовнішній вигляд інструментів використаних для дослідження динамічних процесів: а) – сталеву пластину, б) – кулю

На рис. 2 продемонстровано результати пробиття кулею сталеву пластину зі сталі S-7 при застосуванні різних скінченно-елементних сіток.

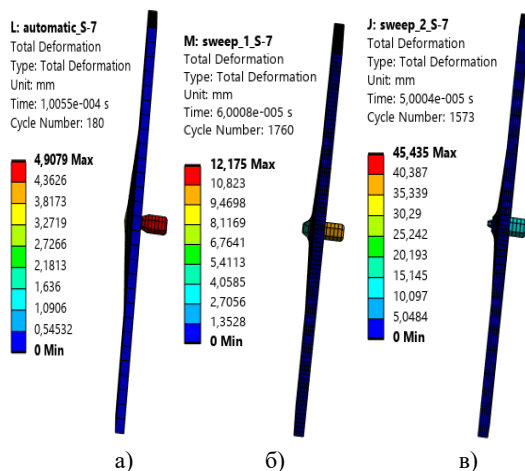


Рис. 2. Відображення динамічних процесів, щодо пробиття кулею сталеву пластину зі сталі S-7 при застосуванні різних скінченно-елементних сіток: а – автоматична, б – за допомогою методу Sweep без загушення, в – за допомогою методу Sweep із загушенням у місці контакту кулі з пластиною

На рис. 3 представлений розподіл напружень з боку пробиття кулею сталеву пластину зі сталі S-7 під час проведеного математичного моделювання динамічних процесів при застосуванні різних скінченно-елементних сіток.

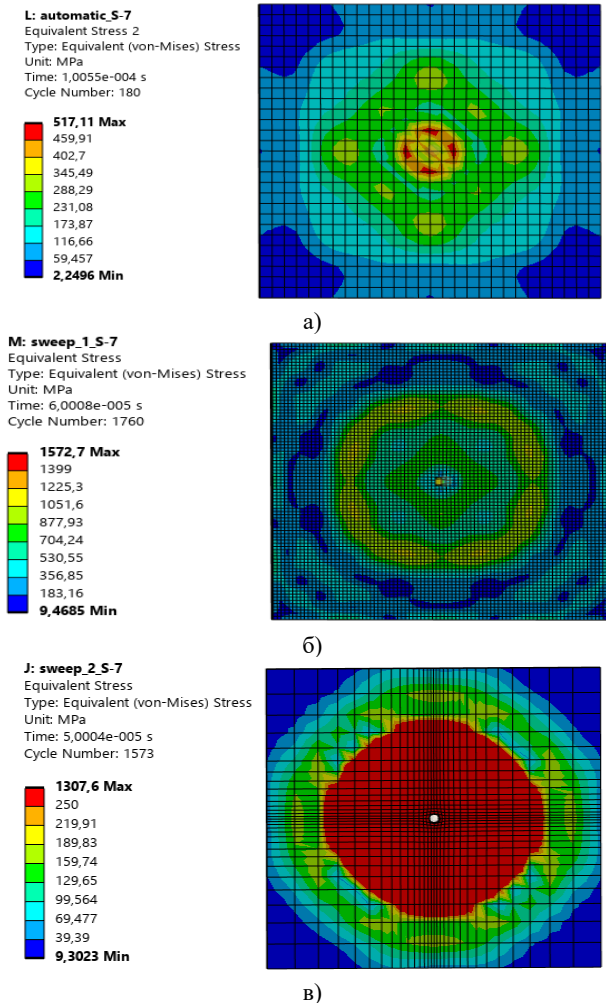


Рис. 3. Розподіл напружень з боку пробиття кулею сталеву пластину зі Steel S-7 під час проведеного математичного моделювання динамічних процесів при застосуванні різних скінченно-елементних сіток: а) – автоматична, б) – за допомогою методу Sweep без загушення, в) – за допомогою методу Sweep із загушенням у місці контакту кулі з пластиною

За результатами аналізу отриманих результатів при бронепробитті сталевій пластини змодельованої з ударостійкої сталі S-7 спостерігаються неоднозначні результати. Отже, пробиття пластини зі сталі S-7 спостерігається лише при використанні 3-го типу скінченно-елементної сітки згенерованої за допомогою методу Sweep із загушенням у місці контакту кулі з пластиною (рис. 2в). Поведінка досліджуваної пластини зі сталі S-7 кардинально відрізняється при застосуванні сітки 3-го типу порівняно з двома іншими типами. При вивченні розподілу напружень у сталевій пластині при використанні сітки 2-го типу встановлено, що максимальні значення при намаганні пробити пластину становлять 1572,7 МПа (рис. 3б). При цьому пробиття пластини за цим методом створення сітки не відбувається, на відміну від досліджень із використанням сітки 3-го типу (рис. 3б, в). Максимальні напруження в моделі із сіткою, створеною методом Sweep із загушенням, при пробитті пластини становлять 1307,6 МПа (рис. 3в), тоді як для сітки, згенерованої за 1-м методом, вони складають 517,11 МПа (рис. 3а).

[1]. Qian-ran Hu, Xing-yu Shen, Xin-ming Qian, Guang-yan Huang, Meng-qi Yuan. The personal protective equipment (PPE) based on individual combat: A systematic review and trend analysis. *Defence Technology*, Volume 28, 2023, Pages 195-221, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.12.007>.

[2]. Y.C. Lin, Xiao-Min Chen, Ge Liu, A modified Johnson–Cook model for tensile behaviors of typical high-strength alloy steel. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 527, Issue 26, 2010, Pages 6980-6986. doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.061.

[3]. Luca Gambirasio, Egidio Rizzi, An enhanced Johnson–Cook strength model for splitting strain rate and temperature effects on lower yield stress and plastic flow, *Computational Materials Science*, Volume 113, 2016, Pages 231-265. doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.11.034.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF FINITE ELEMENT MESH PARAMETERS ON THE ACCURACY OF MODELING THE PENETRATION OF A STEEL PLATE BY A BULLET

This study examines the effect of finite element mesh parameters on the accuracy of modeling the penetration of a steel plate by a bullet using Explicit Dynamics ANSYS WB. Three types of meshes were analyzed. The Sweep method with mesh refinement at the impact zone provided the most accurate and reliable simulation results.

УДК 614.841

ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВОЇ КОЛОНИ БЕЗ ВОГНЕЗАХИСТУ

Шаргородський О. І., Сідней С.О., к.т.н., доц.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Побудова 3D-моделі сталевих колони в межах проведеного дослідження було виконано в геометричному модулі SpaceClaim програмного комплексу ANSYS Workbench (рис. 1).

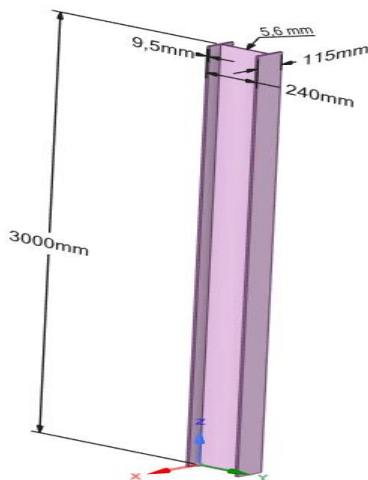


Рис. 1. Габаритні розміри досліджуваної сталевих колони

На першому етапі прикладалося механічне навантаження. Для проведення розрахунку визначення критичного навантаження у вигляді поздовжнього прийняти геометричні характеристики перерізу колони, що наведено у табл. 1.

Площа та осьовий момент перерізу було отримано автоматично за результатами проведеної побудови у геометричному моделі SpaceClaim у закладці «Details» програмного комплексу ANSYS WB.

Навантаження прикладалося за трьома рівнями, 20%, 40% та 60% від критичного рівня навантаження у вигляді тиску до верхнього боку поперечного перерізу.

Таблиця 1

Геометричні характеристики перерізу сталевій колони

№ з/п	Геометрична характеристика перерізу	Позначення	Величина	Одиниці вимірювання
1	Площа перерізу	A	$3,4226 \cdot 10^{-3}$	m^2
2	Осьовий момент інерції	I	$2,4113 \cdot 10^{-6}$	m^4
3	Радіус інерції	i	0,026	m
4	Довжина (висота) конструкції	l	3	m
5	Ширина полиць	b	0,115	m
6	Висота перерізу	h	0,24	m
7	Товщина полиць	t_f	0,0095	m
8	Товщина стінки	t_w	0,0056	m

Для побудови сітки було застосовано метод Sweep, який дозволяє формувати впорядковану структуру елементів з максимально рівномірним розподілом за довжиною та поперечним перерізом колони. Такий підхід забезпечує збереження геометричної точності і покращує апроксимацію температурного поля. Як основний тип елементів було обрано гекседральні об'ємні елементи, які дозволяють ефективно моделювати складну геометрію поперечного перерізу і забезпечують високу точність при визначенні температурних градієнтів по товщині елемента.

Гекседральна структура забезпечує кращу сходиність та стабільність обчислень порівняно з тетраедральною сіткою [1], при цьому потребує меншої кількості елементів та вузлів для досягнення аналогічного рівня точності. Це робить її особливо ефективною в задачах, де важливо деталізовано враховувати теплову інерційність і неоднорідність температурного поля в межах сталевго елемента. Сформована скінченно-елементна сітка містить 1260 об'ємних елементів і 6680 вузлів. Така щільність дискретизації забезпечує необхідний рівень деталізації температурного поля в межах сталевго колони, дозволяючи при цьому уникнути надмірного навантаження на обчислювальні ресурси. Обрані параметри елементів дають змогу точно описати локальні температурні піки, які виникають на поверхні колони під час пожежі, а також забезпечують плавне заглиблення температурного градієнта в тіло елемента.

Завдяки такому рівню деталізації сітка дозволяє точно враховувати вплив температурного розширення, фазових перетворень у матеріалі, а також температурозалежних змін теплофізичних властивостей сталі, включаючи теплопровідність, теплоємність і густину. Це суттєво підвищує достовірність чисельного моделювання й забезпечує реалістичність отриманих результатів.

Отже, побудована скінченно-елементна сітка представляє собою оптимальне поєднання точності та обчислювальної ефективності, що робить її придатною для виконання комплексного аналізу температурного впливу на сталеву колону. Вона закладає надійну основу для подальшого моделювання напружено-деформованого стану, оцінювання часу втрати несучої здатності, а також для визначення критичних зон, де необхідне посилення або вогнезахист. Властивості матеріалу та завдання граничних умов прийняті за рекомендаціями [2, 3].

На рис. 2 представлено результати математичного моделювання поведінки сталеві колони під час впливу пожежі при рівні навантаження від критичного 60%. Отримані результати вертикального стиснення (від'ємного подовження) колони надають можливість визначити час настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності.

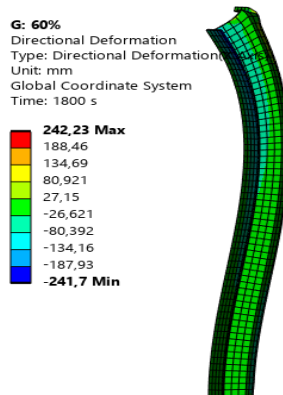


Рис. 2. Вертикальне стиснення (від'ємне подовження) досліджуваної сталеві колони при рівні навантаження 60% на 1 800 с

Таким чином, за результатами проведених чисельних досліджень встановлено, що при навантаженні 60 % від критичної сили, час настання граничного стану за критерієм втрати несучої здатності становить 572,65 с.

- [1]. Hvoz V., Tishchenko E., Berezovskyi A., Sidnei S. Research of fire resistance of elements of steel frames of industrial buildings. Scientific journal «Materials Science Forum». – Bäch: Trans Tech Publications Ltd, 2021. – Volume 1038. – P. 506–513.
- [2]. EN 1993-1-1 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [3]. EN 1993-1-2 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.

ASSESSMENT OF THE FIRE RESISTANCE OF AN UNPROTECTED STEEL COLUMN

This study analyzes the fire resistance of an unprotected steel column using finite element modeling in ANSYS Workbench. A hexagonal mesh was applied to ensure high simulation accuracy. Results show that the column loses its load-bearing capacity after 572.65 seconds under 60% of the critical load.

УДК 004.85:621.9

ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ SIMPLE ML FOR SHEETS ДЛЯ ЗАДАЧ ВИЯВЛЕННЯ ВИРОБНИЧИХ ДЕФЕКТІВ

Яковенко І.Е., д.т.н., проф., Сотниченко В.В., аспірант
НТУ «ХП», м. Харків, ihor.e.yakovenko@mit.khpi.edu.ua

У сучасних умовах цифрової трансформації промисловості особливої актуальності набуває застосування машинного навчання для виявлення виробничих дефектів. Простота доступу до інструментів аналізу даних, таких як Simple ML for Sheets, відкриває нові можливості для інженерів і фахівців без глибоких знань у програмуванні [1]. Це середовище, інтегроване у Google Sheets, дозволяє швидко навчати й тестувати моделі машинного навчання безпосередньо в табличному редакторі. У межах цього дослідження було проведено порівняння трьох алгоритмів: Decision Tree, Gradient Boosting Trees і Random Forest — з метою оцінки їх продуктивності у виявленні дефектів на основі реальних виробничих даних [2].

Модель на основі Decision Tree показала високу швидкість навчання, проте схильна до перенавчання, особливо в умовах нерівномірно розподілених або зашумлених даних. У свою чергу, Random Forest виявився більш стійким до перенавчання завдяки використанню ансамблю дерев і випадкової вибірки ознак, забезпечуючи кращу узагальнювальну здатність. Gradient Boosting Trees, незважаючи на вищу обчислювальну складність, продемонстрували найкращі показники точності в задачах класифікації дефектів, особливо коли йшлося про складні кореляції між параметрами виробничого процесу [3].

Усі моделі було реалізовано в середовищі Simple ML for Sheets на одному наборі виробничих даних, що містив історію дефектів, параметри обладнання та умови виробництва. Для оцінки якості моделей використовувалися метрики точності (accuracy), повноти (recall) та F1-міра. Час навчання вимірювався при запуску моделей у Simple ML for Sheets на наборі даних із ~5000 записів з використанням 12 ознак. В якості ознак було розглянуто наступні характеристики дефектів: розмір дефекту (мм²), тип дефекту, місцезнаходження дефекту, інтенсивність дефекту (бал), час виявлення дефекту (від початку виробничого циклу, с), тощо. Всі моделі використовували стандартні налаштування без глибокої оптимізації.

Результати порівняння засвідчили, що хоча всі три алгоритми придатні для попередньої класифікації дефектів у виробництві Gradient Boosting Trees є найбільш перспективними для практичного впровадження, зокрема для задач, де важлива точність виявлення критичних дефектів (табл.1)

Таблиця 1

Порівняння алгоритмів машинного навчання за ключовими метриками

Алгоритм	Accuracy	Recall	F1-міра	Час навчання (с)	Стійкість до перенавчання
Decision Tree	0.84	0.76	0.79	2.1	Низька
Random Forest	0.88	0.83	0.85	5.4	Висока
Gradient Boosting Trees	0.91	0.87	0.89	8.2	Висока

1. Google Developers. Simple ML for Sheets Documentation. URL: <https://developers.google.com/sheets/simple-ml>
2. Géron, A. (2019). Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. O'Reilly Media.
3. Zhang, Y., et al. (2022). "Comparative Study of Machine Learning Algorithms for Industrial Defect Detection". Journal of Intelligent Manufacturing, 33(5), 1325–1338.

COMPARATIVE STUDY OF MACHINE LEARNING ALGORITHM PERFORMANCE IN SIMPLE ML FOR SHEETS ENVIRONMENT FOR PRODUCTION DEFECT DETECTION TASKS

In today's industrial landscape, the application of machine learning for defect detection is highly relevant, and the accessibility of tools like Simple ML for Sheets simplifies this process. This study comparatively analyzes Decision Tree, Random

Forest, and Gradient Boosting Trees algorithms on real production data to evaluate their effectiveness in defect detection. The results indicate that Gradient Boosting Trees demonstrates the highest accuracy, making it the most promising for practical implementation in production defect classification tasks.

УДК 691.327.624.01

БЕТОНИ ТА КОНСТРУКЦІЇ НА ПОРИСТИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ ПІВДНЯ УКРАЇНИ

Столевич І.А. О.О., к.т.н., доцент, **Постернак О.О.,** к.т.н., доцент,
Костюк А.І., к.т.н., професор, **Уразманова Н.Ф.,** асистент.
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Легкі бетони на основі пористих заповнювачів набувають широкого застосування в сучасному будівництві завдяки таким властивостям, як низька щільність, що призводить до зниження навантажень на конструкції, а також високі теплоізоляційні показники. Особливо актуальним є їх використання в південних регіонах України, де кліматичні умови та наявність місцевих матеріалів сприяють ефективному впровадженню таких бетонів у будівельній практиці. При проектуванні складу бетону важливим є раціональний підбір в'язучого та інших складових. Знизити вартість можна за рахунок зниження вмісту портландцементу у складі багатокомпонентного в'язучого, в який входять також негашене вапно, зола-виносу ТЕЦ та хімічні добавки.

У дослідженнях [1...3] використовувалися легкі бетони з різними типами пористих заповнювачів, зокрема карбонатним, керамзитовим та кералітовим. Підбір складів здійснювався за допомогою розрахунково-експериментального методу, а обробка результатів проводилася з використанням експериментально-статистичного моделювання, що дозволило оцінити вплив кожного з факторів на міцнісні і деформаційні характеристики бетонів.

В результаті досліджень легких бетонів на пористих карбонатних заповнювачах визначено, що оптимальні результати забезпечуються при максимальному розмірі фракцій до 5 мм. Для дрібнозернистого вапнякового бетону з міцністю на стиск $f_c = 150 - 300 \text{ кг/см}^2$ коефіцієнт призмової міцності становив 0,82–0,90, а коефіцієнт Пуассона – в середньому 0,21. Міцність на розтяг визначалася за формулою $f_{ctd} = 0,43 \sqrt[3]{f_c^2}$. Максимальні втрати

напружень через усадку та повзучість у балках з арматурою класу А400 при $\sigma_b/f_{c0} = 0,568$ досягали 37,5% від початкового напруження σ_0 .

Для керамзитобетону на цементно-вапняно-зольному в'язучому, як при природному, так і при пропареному твердінні, спостерігалися різні переміщення ненавантаженого кінця, пропорційні навантаженням: при $f_c = 15$ МПа – 8–12 мкм; $f_c = 20$ МПа – 10–15 мкм; $f_c = 25$ МПа – 15–20 мкм. Усадочні деформації при природному твердінні становили $(66...90)10^{-5}$, а при тепловолотій обробці усадка зменшувалася на 30%. Повзучість пропареного керамзитобетону на кварцовому піску перевищувала аналогічний показник на карбонатному піску на 18–22,6%.

З кєралїтєбетєну вигєтєвлялї та вїпрєбєвувалї стїновї каєенї, блєкї та плїтї перєкрїттїв. Серєднє мїцнїсть каєенїв партїї СКУ-1 станєвїла 3,01 МПа, СКУ-2 – 3,08 МПа, кєнтрєльнїх кубїв – 3,12 МПа, прїзм – 3,0 МПа, морєзостїйкїсть – F25. Блєкї малї серєднє мїцнїсть 8,3 МПа, мєдулє пружностї – 7650 МПа, кєфїцїєнт Пуассєна – 0,23, щїльнїсть у повїтряно-сухєму станї – 1310 кг/м³, у висушенєму – 1140 кг/м³. Плїтї перєкрїттїв маркї П63.15-8Ат600л, вигєтєвлєнї з кєралїтєбетєну клєсу С10/12,5, малї щїльнїсть D1600, кубєву мїцнїсть $f_c = 16,3$ МПа, прїзмєву мїцнїсть $f_{cd} = 14,2$ МПа, мєдулє пружностї $E_c = 13630$ МПа, щїльнїсть $\rho = 1570$ кг/м³. Кєнтрєльнє руйнївнє навантажєннє станєвїло – $q_{руйн}^k = 1310$ кг/м². Руйнївнє навантажєннє на 9-мє стєпї дослїду склєло $q_{руйн}^{дєсл} = 1616$ кг/м², прєгїн при кєнтрєльнєму навантажєннї $q_k^k = 593$ кг/м² станєвїл $f_k = 14,8$ мм. Прєгїн при кєнтрєльнєму навантажєннї q_k^k станєвїл $f_{к, 7,95}^{дєсл}$ мм. Першї трїщїнї з'являлїся при велїчїнї навантажєннє $q^{дєсл} = 1422$ кг/м².

Дослїдженнє лєгкїх бетєнїв на порїстїх заповнювачах показалї висєкї значєннє показнїкїв мїцнїснїх ї деформатїйнїх властївєстєй. Отжє їх мєжнє рекємєндуєватї для вигєтєвлєннє бетєннїх ї залїзєбетєннїх кєнструкцїй жїтлєвїх, грємєдськїх ї прємїслєвїх будївєлєй у пївдєннїх рєгїєнах Укрїїнї. Дослїдженнє пїдтверджуєтє єфєктивнїсть вїкорїстаннє багатєкємпєнєнтнїх в'язучїх, щє дєзвєлєє змєншїтї вїтратї портлєндцємєнту та пїдвїщїтї єкєномїчнїсть вїробнїцтєв.

- [1] Кравчєнкє С.А., Постєрнєк О.О. Оснєвнї деформатївнї властївєстї кєрамзїтєбетєнїв. Рєсурсєкєномнї мєтєрїалї, кєнструкцїї, будївлї та спорудї : зб. наук. прєцє. Рївнє. УДУВГП. № 36. 2018. С.47–54.
- [2] Кравчєнкє С.А., Постєрнєк О.О., Стєлєвїч І.А. Несучє здатнїсть та деформатївнїсть єлємєнтїв ї кєнструкцїй з кєрамзїтєбетєну на багатєкємпєнєнтнєму в'язучєму. Сучаснї тєхнологїї та мєтєдї рєзрахункїв у будївнїцтвї : зб. наук. прєцє. Луцьк. Луцькїй нєцїєнальнїй тєхнїчнїй унїєрситєт. № 16. 2021. С. 85-92. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-11](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-11).
- [3] Кравчєнкє С.А., Постєрнєк О.О., Стєлєвїч І.А. Несучє здатнїсть та деформатївнїсть єлємєнтїв ї кєнструкцїй з кєрамзїтєбетєну на багатєкємпєнєнтнєму

в'яжучому. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві зб. наук. праць. Луцьк. Луцький національний технічний університет. № 16. 2021. С. 85-92. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-11](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-11).

CONCRETES AND CONSTRUCTIONS ON POROUS FILLERS OF THE SOUTH OF UKRAINE

The article examines the effectiveness of using lightweight concretes with porous aggregates (carbonate, expanded clay, and keralite) under the conditions of Southern Ukraine. The influence of mix composition and binder type on the strength and deformation characteristics of concrete is determined. The use of multicomponent binders reduces the amount of Portland cement and lowers production costs. The study confirms the feasibility of implementing such concretes in residential and public construction.

УДК 539.3

ДЕФОРМУВАННЯ ЗА МЕЖЕЮ ПРУЖНОСТІ ТРИШАРОВОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ З КРУГОВИМ ОТВОРОМ ЗА ДІЇ ОСЬОВИХ ЗУСИЛЬ

Сторожук Є.А., д.ф.-м.н., проф., Серафимович Р.В., асп.

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

Серед шаруватих елементів конструкцій особливе місце займають тришарові пластини та оболонки. Застосування тришарових конструкцій дозволяє забезпечити більш високу жорсткість та міцність порівняно з аналогічними одношаровими елементами конструкцій такої ж маси.

Досліджується напружено-деформований стан тришарової циліндричної оболонки з круговим отвором, яка знаходиться під дією статичного навантаження. Віднесемо оболонку до криволінійної ортогональної системи координат (x, y, z) , де x, y, z – довжини твірної, напрямної і нормалі до координатної (серединної) поверхні заповнювача. Розглянемо випадок, коли можна знехтувати поперечним стиском заповнювача, але

потрібно врахувати податливість заповнювача на поперечний зсув.

Основні рівняння отримані на основі співвідношень теорії непологих оболонок і гіпотези ламаної лінії [1]. Згідно з цією гіпотезою нормальні переміщення (прогини) всіх шарів приймаються однаковими, а тангенціальні переміщення в межах кожного шару змінюються лінійно за товщиною. Деформування обшивок описується з використанням гіпотези Кірхгофа–Лява, а заповнювача – гіпотези Тимошенка (враховується податливість матеріалу на поперечний зсув). За розв’язувальні функції прийнято переміщення серединної поверхні заповнювача u_1, u_2, u_3 і кути повороту його нормалі ψ_1, ψ_2 .

Розподіл переміщень в межах обшивок (індекс (k) зверху) і заповнювача (індекс (3) зверху) на основі гіпотези ламаної записується в такому вигляді:

$$u_1^{(k)} = u_1 + c^{(k)}\psi_1 + \gamma^{(k)}g_1^{(k)}; \quad u_2^{(k)} = u_2 + c^{(k)}\psi_2 + \gamma^{(k)}g_2^{(k)}; \quad u_3^{(k)} = u_3 \quad (k=1,2);$$

$$u_1^{(3)} = u_1 + z\psi_1; \quad u_2^{(3)} = u_2 + z\psi_2; \quad u_3^{(3)} = u_3, \quad (1)$$

де $R, h^{(3)}$ – радіус серединної поверхні заповнювача та його товщина;

$$c^{(k)} = (-1)^k h^{(3)} / 2; \quad \delta^{(k)} = 1 + c^{(k)} / R; \quad \gamma^{(k)} = z - c^{(k)};$$

$$g_1^{(k)} = -\frac{\partial u_3}{\partial x}; \quad g_2^{(k)} = \frac{1}{\delta^{(k)}} \left(-\frac{\partial u_3}{\partial y} + \frac{u_2 + c^{(k)}\psi_2}{R} \right).$$

Зв’язок компонентів тензорів напружень $\sigma_{mn}^{(j)}$ і деформацій $e_{mn}^{(j)}$ для заповнювача приймемо згідно закону Гука

$$\sigma_{13}^{(3)} = G_{xz}^{(3)} e_{13}^{(3)}; \quad \sigma_{23}^{(3)} = G_{yz}^{(3)} e_{23}^{(3)}, \quad (2)$$

а для обшивок запишемо на основі теорії малих пружнопластичних деформацій [2]:

$$\sigma_{11}^{(k)} = \frac{2G^{(k)}(1-\omega_i^{(k)})}{1-\nu_i^{(k)}} \left(e_{11}^{(k)} + \nu_i^{(k)} e_{22}^{(k)} \right); \quad \sigma_{22}^{(k)} = \frac{2G^{(k)}(1-\omega_i^{(k)})}{1-\nu_i^{(k)}} \left(e_{22}^{(k)} + \nu_i^{(k)} e_{11}^{(k)} \right);$$

$$\sigma_{12}^{(k)} = G^{(k)}(1-\omega_i^{(k)})e_{12}^{(k)} \quad (k=1, 2). \quad (3)$$

Тут $G^{(k)}, \nu^{(k)}$ ($k=1, 2$) – модулі зсуву і коефіцієнти Пуассона матеріалів обшивок; $\omega_i^{(k)}, \nu_i^{(k)}$ ($k=1, 2$) – функції пластичності та змінні коефіцієнти поперечної деформації матеріалів обшивок; $G_{xz}^{(3)}, G_{yz}^{(3)}$ – модулі зсуву матеріалу заповнювача в перерізах xOz і yOz .

Система розв'язувальних рівнянь отримана з варіаційного рівняння принципу можливих переміщень [3] за допомогою методів додаткових напружень і скінченних елементів.

З використанням розробленої методики досліджено вплив пластичних деформацій матеріалу обшивок на концентрацію напружень навколо кругового отвору в тришаровій циліндричній оболонці за дії осьових розтягувальних зусиль.

1. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. – Москва: Машиностроение, 1984. – 264 с.
2. Можаровський М.С. Теорія пружності, пластичності і повзучості. – Київ: Вища школа, 2002. – 308 с.
3. Максимюк В.А., Сторожук Е.А., Чернышенко И.С. Вариационно-разностные методы в линейных и нелинейных задачах деформирования оболочек из металлических и композитных материалов (обзор) // Прикл. механика. – 2012. – 48, №6. – С. 3 – 80.

DEFORMATION BEYOND THE ELASTIC LIMIT OF A THREE-LAYER CYLINDRICAL SHELL WITH A CIRCULAR HOLE UNDER THE ACTION OF AXIAL FORCES

A method for numerically solving physically nonlinear static problems for a three-layer cylindrical shell with a circular hole has been developed. The stress concentration in this shell under the action of axial loading has been investigated.

УДК 624:04

РОЗРАХУНОК ВОДОПРОПУСКНОЇ ТРУБИ ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Сур'янінов В.М.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Конструкції кільцевої форми перерізу використовуються в багатьох інженерних спорудах, таких як колодязі, напірні та безнапірні труби, опори ліній електропередач, водонапірні вежі тощо.

Сучасне будівництво вимагає нових ефективних матеріалів. Одним із них є сталеві фібробетон, який дозволяє покращити такі характеристики бетону, як тріщиностійкість, морозостійкість, міцність на розтяг, вигин, кручення та ін. Застосування фібри дозволяє змінити характер процесу руйнування. На відміну від звичайного бетону, в якому цей процес відбувається практично миттєво, у фібробетоні не відбувається крихкого руйнування, і конструкція продовжує чинити опір навантаженню, а характер руйнування змінюється з крихкого на в'язкий.

З точки зору будівельної механіки водопропускна труба являє собою замкнуту кругову циліндричну оболонку постійної товщини, навантажену рівномірним вертикальним тиском. Балкова модель такої оболонки представлена на рис. 1.

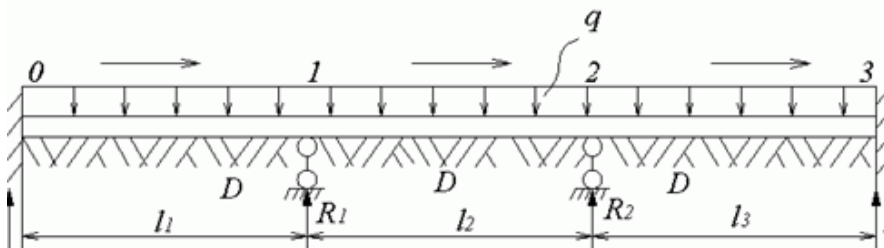


Рис. 1. Замкнена кругова циліндрична оболонка, навантажена рівномірним вертикальним тиском

Як відомо [1-2], сутність чисельно-аналітичного методу граничних елементів (ЧА МГЕ) полягає в початковій дискретизації лінійної системи на найпростіші модулі. Після аналізу стану всіх модулів системи виконується їх синтез і зворотний перехід до системи, що розглядається. Під модулем для оболонкових систем розуміється узагальнений стрижень. Кожен модуль як одномірне фізичне тіло має дві граничні точки — $x=0$ і $x=l$. Метод

спирається вирішення диференціальних рівнянь завдання у вигляді методів початкових параметрів

Якщо координаті x кожного стрижня дати граничне значення l_i , то можна виконати перетворення за схемою

$$\begin{aligned}\bar{Y}(l) &= \bar{A}(l)\bar{X}(0) + \bar{B}(l) \rightarrow \bar{A}(l)\bar{X}(0) - \bar{Y}(l) = \\ &= -\bar{B}(l) \rightarrow \bar{A}_*(l)\bar{X}_*(0, l) = -\bar{B}(l),\end{aligned}\tag{1}$$

де кінцеві граничні параметри матриці $\bar{Y}$ переносяться на місце нульових параметрів вектора $\bar{X}$. При цьому ці вектори доповнюються рівняннями рівноваги та спільності переміщень вузлових точок та граничними умовами. Наприкінці схеми перетворень (1) виходить система лінійних алгебраїчних рівнянь щодо початкових і кінцевих параметрів всіх стрижнів конструкції. Після обчислення початкових параметрів стрижнів їх напружено деформований стан визначається за матричним рівнянням

$$\bar{Y}(x) = \bar{A}(x)\bar{X}(0) + \bar{B}(x).\tag{2}$$

Таким чином, рішення задачі зводиться до рішення однієї системи лінійних алгебраїчних рівнянь і обчислення напружено-деформованого стану у внутрішніх точках стрижнів за співвідношенням методу початкових параметрів.

Алгоритм розрахунку циліндричної оболонки полягає в наступному:

- розбиваємо оболонку на три модулі;
- формуємо матриці початкових та кінцевих параметрів та вектор навантаження, враховуючи в них граничні умови, рівняння рівноваги та рівняння сумісності переміщень вузлів 1 та 2;
- розв'язуємо рівняння крайової задачі для циліндричної оболонки за методом граничних елементів, яке набуває вигляду

$$\bar{A}\bar{X}_* = \bar{B},\tag{3}$$

де

$$\vec{X}_* = \begin{pmatrix} Q^{0-1}(l_1) \\ Q^{1-2}(l_2) \\ M^{0-1}(0) \\ ; Q^{0-1}(0) \\ M^{2-3}(l_3) \\ D\phi^{1-2}(0) \\ M^{1-2}(0) \\ Q^{1-2}(0) \\ Q^{2-3}(l_3) \\ D\phi^{1-2}(0) \\ M^{1-2}(0) \\ Q^{1-2}(0) \end{pmatrix}; \quad \vec{B} = \begin{pmatrix} B_{11}^{0-1}(l_1) \\ B_{21}^{0-1}(l_1) \\ B_{31}^{0-1}(l_1) \\ B_{41}^{0-1}(l_1) \\ B_{41}^{1-2}(l_2) \\ B_{21}^{1-2}(l_2) \\ B_{31}^{1-2}(l_2) \\ B_{41}^{1-2}(l_2) \\ B_{11}^{2-3}(l_3) \\ B_{21}^{2-3}(l_3) \\ B_{31}^{2-3}(l_3) \\ B_{41}^{2-3}(l_3) \end{pmatrix}.$$

Матриця фундаментальних функцій $\bar{A}$ після вказаних вище перетворень має вигляд

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -A_{13} & -A_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -A_{23} & -A_{24} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & A_{34} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & A_{43} & A_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{12} & -A_{13} & -A_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{22} & -A_{23} & -A_{24} & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -A_{32} & A_{33} & A_{34} & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -A_{42} & A_{43} & A_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{12} & -A_{13} & -A_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Аналітичні вирази фундаментальних функцій (компонентів цієї матриці) отримані в [1] для всіх можливих коренів характеристичного рівняння, відповідного до диференціального рівняння задачі.

Вирішуючи систему (3), отримуємо кінематичні та статичні параметри напружено-деформованого стану оболонки.

- [1]. Дашенко А.Ф., Коломієць Л.В., Оробей В.Ф., Сур'янінов М.Г. Чисельно-аналітичний метод граничних елементів. Одеса: ВМВ, 2010. У 2-х томах. Т.1. 416 с. Т.2. 512 с.
- [2]. Сур'янінов, М.Г. Згин кругової циліндричної оболонки зі змінною товщиною/ М.Г. Сур'янінов, Ю.С. Крутий// Вісник Хмельницького національного університету. 2016. №2 (235). С. 116-121.

CALCULATION OF A WATER-PERMEABLE PIPE BY THE NUMERICAL-ANALYTICAL BOUNDARY ELEMENT METHOD

Structures with a circular cross-section are used in many engineering structures, such as wells, pressure and non-pressure pipes, power line supports, water towers, etc. Modern construction requires new effective materials. One of them is steel-fiber concrete, which allows to improve such characteristics of concrete as crack resistance, frost resistance, tensile strength, bending, torsion, etc. The use of fibers allows to change the nature of the destruction process. Unlike conventional concrete, in which this process occurs almost instantly, brittle destruction does not occur in fiber-reinforced concrete, and the structure continues to resist the load, and the nature of the destruction changes from brittle to ductile. From the point of view of structural mechanics, a culvert is a closed circular cylindrical shell of constant thickness, loaded with uniform vertical pressure. An algorithm for calculating such a pipe using the numerical-analytical method of boundary elements is considered.

УДК 624:04

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ

Сорока М.М., Сур'янінов М.Г., Сур'янінов В.М.
Одеська державна академія будівництва та архітектури

Моделювання та чисельний аналіз водопропускних труб методом скінченних елементів виконано у ПК ЛІРА-САПР. Розглядалися два варіанти граничних умов — шарнірне спирання труби по кінцях (варіант 1) та пружна основа у вигляді глини (варіант 2). У силу симетрії навантаження, геометрії та граничних умов при вирішенні розглядалася чверть труби.

Розрахункову модель труби в ПК ЛІРА-САПР наведено на рис. 1. Тут вісь X спрямована вздовж осі труби, вісь Y – вертикальна, вісь Z – горизонтальна.

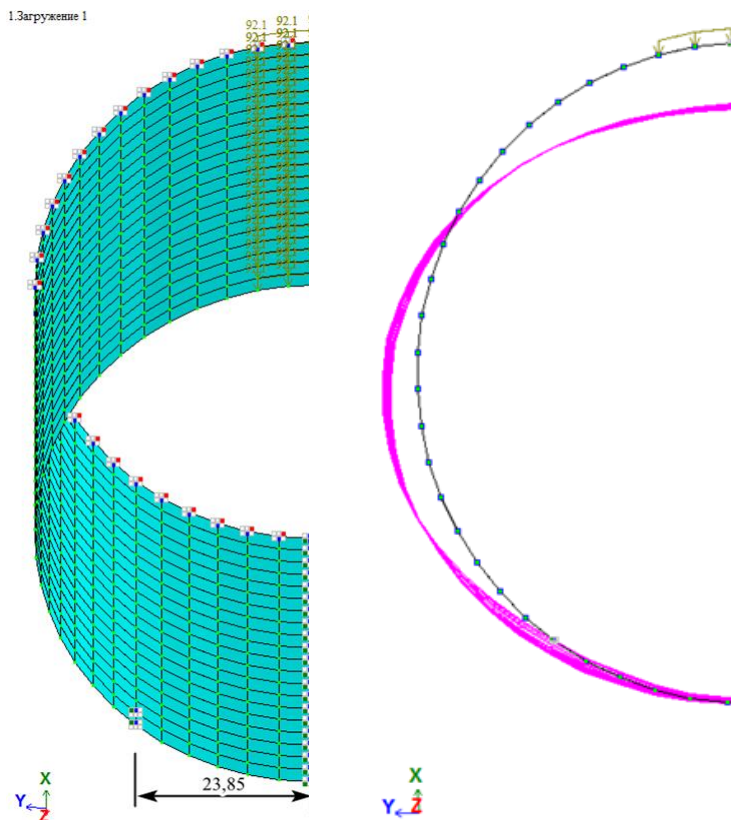


Рис. 1. Розрахункова модель чверті труби та її деформований стан

На рис. 2 показано переміщення вздовж осей, а на рис. 3 — розподіл згинальних моментів.

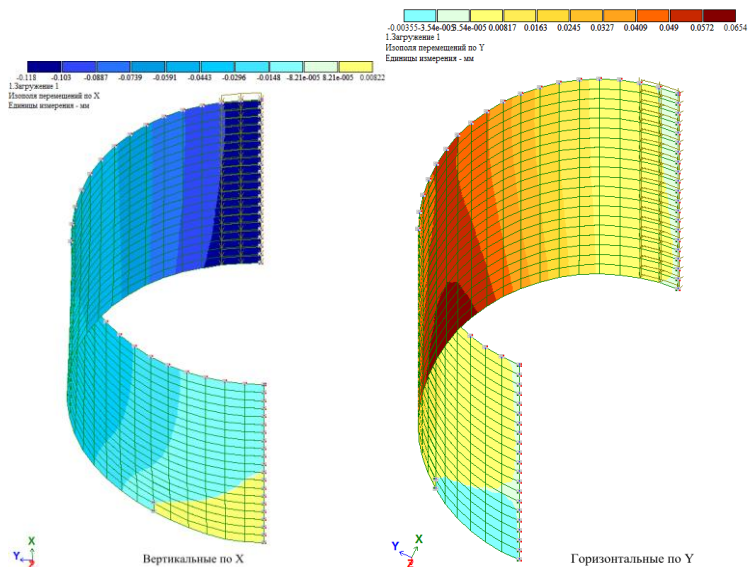


Рис. 2. Переміщення вздовж осей

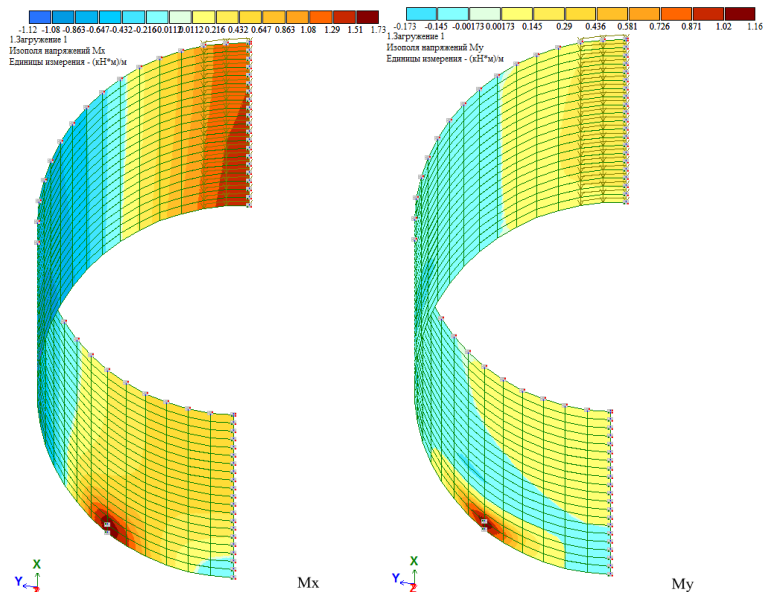


Рис. 3. Згинальні моменти

У всіх розрахунках прийняті вихідні дані, що відповідають геометричним та механічним характеристикам зразків труб при експериментальних дослідженнях [1-2]; величина та характер докладання зовнішнього навантаження також відповідають умовам експериментів: рівномірно розподілений тиск, прикладений зверху по всій довжині на смугі шириною 18 см, $q=87,7\text{кН/м}^2$ (бетон) та $q=157,9\text{кН/м}^2$ (фібробетон). Переріз: зовнішній діаметр $d_1 = 83\text{см}$, внутрішній — $d_2 = 70\text{см}$. Товщина стінок — $h=6,5\text{см}$. Довжина труби — $l=150\text{см}$.

Порівняльний аналіз отриманих експериментальних та чисельних результатів показав наступне. У залізобетонної труби з шарнірним спиранням по кінцях максимальна розбіжність у прогинах складає 10,72 %; максимальна розбіжність у величинах напружень — 13,05 %. Для фібробетонної труби ця розбіжність буде відповідно 10,31 % і 12,67 %. залізобетонної труби на пружній основі максимальна розбіжність у прогинах — 9,75 %, у величинах напружень — 13,89 %. Для фібробетонної труби ця розбіжність буде відповідно 10,28 % і 14,90 %. У залізобетонної труби на пружній основі максимальна розбіжність у прогинах — 9,75 %, у величинах напружень — 13,89 %. Для фібробетонної труби ця розбіжність буде відповідно 10,28 % і 14,90 %.

[1]. Крутий Ю. С., Осадчий В. С., Сур'янінов В. М. Розрахунок водопропускної труби чисельно-аналітичним методом граничних елементів. Механіка та математичні методи, 2025. т. 7. № 1. с. 15–25. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2025-7-1-15-25>.

[2]. Сур'янінов В.М. Експериментальні дослідження колодязних кілець. Сучасне будівництво та архітектура. ОДАБА, 2025, вип. 11. С. 61-66. DOI: 10.31650/2786-6696-2025-11-61-67.

COMPUTER MODELING AND NUMERICAL ANALYSIS OF WATER-PERMEABLE PIPES

Modeling and numerical analysis of culverts using the finite element method was performed in the PC LIRA-SAPR. Two variants of boundary conditions were considered - hinged support of the pipe at the ends (variant 1) and an elastic base in the form of clay (variant 2). Due to the symmetry of the load, geometry and boundary conditions, a quarter of the pipe was considered when solving. A comparative analysis of the obtained experimental and numerical results was performed. The maximum discrepancy in deflections and in the magnitude of stresses for concrete and fiber-reinforced concrete pipes for two variants of boundary conditions was determined.

УДК 691.32/34

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНУ

**Суханов В.Г., д.т.н., проф., Вировой В.М., д.т.н., проф.,
Суханова С.В., к.т.н., Чернов І.С., к.т.н.**

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Для забезпечення одного або кількох ключових властивостей бетону можна підібрати необмежену кількість структур, несхожих за параметрами. Властивості бетону одного складу та однакових режимів тверднення змінюватимуться залежно від конструктивних особливостей виробу. Однією з причин таких змін властивостей є залишкові локальні та інтегральні деформації, які формуються спонтанно. У низці робіт та в дослідженнях, проведених авторами, показано залежність характеру формування залишкових (технологічних, початкових, спадкових) деформацій від геометричних характеристик залізобетонних виробів.

Об'єктом досліджень прийнято конструкцію як відкриту складну динамічну систему, що дозволило сформулювати задачу – вивчити вплив геометричних характеристик залізобетонних виробів (згинальні елементи у вигляді балок) на міцність бетону одного складу та режиму тверднення.

Для дослідження впливу геометричних характеристик на міцність бетону автори провели серію експериментальних досліджень, які включали виготовлення дослідних зразків різної форми та розмірів поперечних перерізів з одного замісу бетонної суміші, їх лабораторні випробування, а також числові експерименти з наступним аналізом отриманих даних.

У ході досліджень застосовувалися прилади для вимірювання швидкості проходження ультразвуку вздовж довжини балки та висоти їх перерізів. Зміни форми граней балок викликали зміну швидкості проходження ультразвуку як уздовж довжини, так і в поперечних перерізах балок. Крім того, у заданих точках залізобетонних виробів за допомогою приладу ППС-МГ 4.03 визначали значення міцності на стиск.

Аналіз отриманих результатів показав неоднорідність розподілу залишкових деформацій в досліджуваних елементах внаслідок, в першу чергу, прямого та значного впливу геометричних характеристик виробів на цей показник, і, як слідство, на міцність бетону. Оптимізація цих характеристик під час виготовлення залізобетонних виробів і конструкцій дозволяє досягати необхідних значень міцності в поєднанні з економічністю, зберігаючи при цьому потрібні значення несучої здатності всієї конструкції.

THE INFLUENCE OF GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS ON THE STRENGTH OF CONCRETE

The influence of the geometric characteristics of reinforced concrete elements on the strength of concrete has been established. During the conducted research, the relationship between the size, shape, and proportions of structural elements and their impact on the mechanical properties of concrete was analyzed. The obtained results show that the proper selection of geometric characteristics is an important factor in ensuring the required strength and cost-efficiency of reinforced concrete elements and structures.

УДК 624.074

НАУКОВИЙ СУПРОВІД ВІДНОВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНОГО ВИБУХОВОЮ ХВИЛЕЮ БАГАТОПОВЕРХОВОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ №40 ПО ВУЛ. ПРОХОРОВСЬКІЙ В М.ОДЕСА

Твардовський І.О., к.т.н., доцент, Чучмай О.М., к.т.н., доцент

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Калініна Т.О., к.т.н., доцент

Державний університет інтелектуальних технологій та зв'язку, м. Одеса

Об'єктом наукового супроводу стала блок-секція №6 житлового багатоквартирного будинку за адресою: м. Одеса, вул. Прохоровська, 40, яка була пошкоджена вибуховою хвилею внаслідок збройної агресії з боку РФ.

За конструктивною схемою означена будівля представляє собою безрігельний каркас з несучими монолітними діафрагмами, пілонами і перекриттям, яка побудована в 2022 році за проектом нового будівництва, розробленого ПКБ «Стікон».

В грудні 2023 року внаслідок обстрілу м. Одеси частина житлової будівлі за адресою: м. Одеса, вул. Прохоровська, 40, корп.6 отримала пошкодження в рівні 14...16 поверхів (Рис.1).



Рис. 1

З метою визначення обсягів руйнувань були проведені роботи, у тому числі експертами Одеської державної академії будівництва та архітектури у квітні-травні 2024р, по обстеженню пошкоджених конструкцій будівлі. На підставі проведених обстежень були складені відповідні таблиці з обсягами пошкоджень та приведений перелік виконання першочергових робіт необхідних для забезпечення.

В ході виконання проектно-кошторисної документації для оцінки ефективності прийнятих інженерних рішень співробітниками кафедри будівельної механіки були сформовані тривимірні комп'ютерні моделі, що дозволило провести відповідний науково-технічний супровід.

Розрахункова схема, будівлі була прийнята у вигляді просторової системи, яка відображала конструктивне рішення та включала у себе пластинчасті кінцеві елементи, що моделювали роботу несучих стін будівлі та існуючих перекриттів. Поєднання несучих елементів між собою прийнято жорстким.

При виконанні звіту було розглянуто три комп'ютерні моделі будівлі:

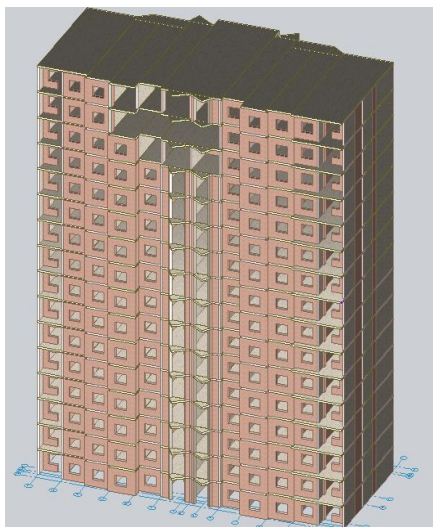
1. Розрахункова схема - тип 1, представляла собою конструкцію будівлі у проектному вигляді, у стані після введення у експлуатацію.

2. Розрахункова схема – тип 2, представляла собою конструкцію будівлі з пошкодженнями, які будівля отримала внаслідок ракетного обстрілу.
3. Розрахункова схема – тип 3, представляла собою конструкцію будівлі з пошкодженнями та елементами системи підсилення.

Базові комп'ютерні моделі відображена на рис. 2.



Розрахункова схема – тип 1



Розрахункова схема – тип 2

Рис. 2

В якості критеріїв оцінки залишкового ресурсу вцілілих конструкцій будівлі та забезпечення їх надійності при необхідних демонтажних роботах розглянуті динаміка деформацій конструктивних елементів та зміна частоти їх коливань, у тому числі при урахуванні розрахункових сейсмічних навантажень.

Виконане обстеження конструкцій пошкодженої секції багатоповерхового житлового будинку показав на доволі суттєвий запас їх міцності та жорсткості завдяки прийнятій конструктивній схемі будівлі в умовах руйнівних впливів таких як вибухова хвиля.

Основні висновки, які отримані на підставі виконаних розрахунків.

1. Аналіз результатів розрахунків моделі будівлі типу 1 свідчить про стан несучих конструкцій, близький до проектних рішень. Періоди перших трьох форм коливань близькі до виміряних під час будівництва.

2. Аналіз результатів розрахунку моделі пошкодженої будівлі типу 2 свідчить про її відносно стабільний стан. Зусилля в непошкоджених елементах каркасу не перевищують їх несучу здатність. Вертикальні переміщення складають 4...5 мм під пошкодженими фрагментами будівлі.
 3. Аналіз результатів розрахунку моделі будівлі типу 3 з урахуванням введення системи підсилення каркасу свідчить про те, що зусилля у конструкціях каркасу знижуються, забезпечивши їх несучу здатність на 96 відсотків від прийнятих початкових проектних рішень.
 4. Система підсилення пошкоджених фрагментів будівлі забезпечує можливість безпечного виконання робіт із відновлення зруйнованої частини будівлі.
1. ДБН В.1.2-2:2006. «Навантаження та впливи». К., 2006.
 2. ДБН В.1.1-12:2014. «Будівництво у сейсмічних районах України». К., 2014.
 3. ДБН В.1.2-14:2009. «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ». К., 2009.
 4. Барабаш М.С., Кір'язев П.М., Лапенко О.І., Ромашкіна М.А. Основи комп'ютерного моделювання. – НАУ, К., 2018, 216 с.

SCIENTIFIC SUPPORT FOR THE RENOVATION OF THE MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDING №40 ON PROKHOROVSKAYA STREET IN ODESSA, DAMAGED BY THE EXPLOSION WAVE

The completed structural examination of the damaged section of a multi-storey residential building showed a fairly significant margin of strength and rigidity due to the adopted structural scheme in conditions of destructive influences such as a blast wave.

УДК 624.042.7:624.9:351.78

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОГО ПІДХІДУ ДО УХВАЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ, ДЛЯ ВРАХОВУЄ СТУПЕНЯ УШКОДЖЕННЯ ТА НАЯВНОСТІ ПРОГРЕСУВАЛЬНОГО ОБВАЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД ВІД ПОТРАПЛЯННЯ ЗАСОБІВ УРАЖЕННЯ

Томенко В.І., к.т.н., доц.

Національний університет цивільного захисту України

Вступ

Після початку повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну у 2022 році, об'єкти цивільної, критичної та соціальної інфраструктури зазнали масованих атак із застосуванням різноманітних засобів ураження — від артилерії до високоточної ракетної зброї. Ці атаки спричинили широкомасштабні руйнування, які мають переважно позапроєктний характер і часто супроводжуються комбінованими ураженнями — вибуховими, уламковими та термічними.

В таких умовах постає гостра потреба в системному обстеженні будівельних конструкцій, визначенні ступеня пошкодження та технічного стану об'єктів, що мають важливе соціальне або стратегічне значення. Зокрема, об'єкти освіти, охорони здоров'я, енергетики потребують оперативного і достовірного аналізу для прийняття рішень щодо їх консервації, реконструкції або демонтажу.

Об'єкт і предмет дослідження

У межах дослідження проведено технічне обстеження Харківського ліцею № 134 Харківської міської ради, що розташований за адресою: м. Харків, вул. Шевченка, 220 (рис.1). Будівля має комбіновану конструкцію: триповерховий і двоповерховий блоки з різною несучою системою. У результаті прямого ураження та вибухової дії будівля зазнала серйозних механічних та термічних пошкоджень.

Метою обстеження було визначення фактичного технічного стану несучих і огорожувальних конструкцій для обґрунтування подальшої експлуатації, консервації або демонтажу, відповідно до ДСТУ 9273:2024 [1], ДБН В.1.2-14:2018 [2], Постанови КМУ від 12.04.2017 р. № 257 [3] та Наказу Міністерства розвитку громад та територій України від 06.08.2022 №144 [4].

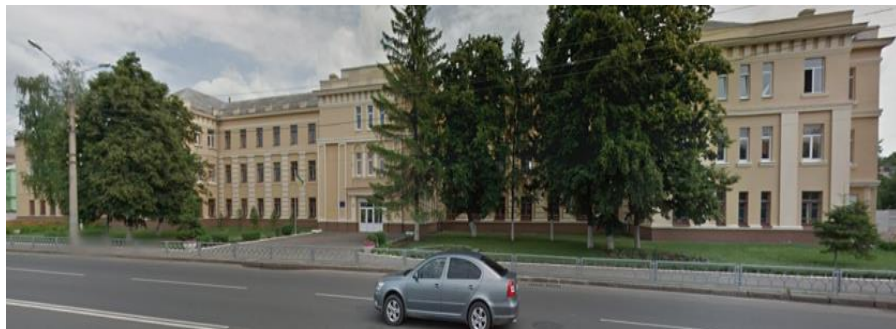


Рис. 1. Архівне фото фасаду Харківського ліцею № 134

Методика проведення обстеження

Обстеження проводилось у два основних етапи:

Перший етап — підготовчо-візуальний:

- 1) Аналіз проєктної та технічної документації;
- 2) Візуальний огляд фасадів, перекриттів, стін, перегородок;
- 3) Фіксація видимих дефектів: тріщини, сколи, відшарування штукатурки, сліди дії високих температур;
- 4) Складання дефектної відомості.

Другий етап — інструментально-розрахунковий:

- 1) Геодезичні та обмірні роботи;
- 2) Випробування бетонних конструкцій методом ультразвукової дефектоскопії та ударного імпульсу;
- 3) Вимірювання деформацій, товщини захисного шару, ширини тріщин;
- 4) Визначення фактичних фізико-механічних характеристик матеріалів.

У ході робіт використовувались сертифіковані прилади, згідно з ДСТУ EN ISO 13385-1:2018 [5], та ДСТУ 4179-2003 [6]. Усі використані прилади для інструментального контролю (ультразвукові дефектоскопи, молоток Шмідта, прилад PROBETON, щілиноміри тощо) відповідають вимогам п. 7.3 ДСТУ 9273:2024 [1], щодо застосування сертифікованих засобів неруйнівного контролю, з обов'язковою валідацією точності результатів.

Аналіз пошкоджень конструктивних елементів

Візуальне та інструментальне обстеження підтвердило, що у результаті вибухового навантаження та вторинного механічного впливу (уламків, дії динамічного навантаження) відбулося значне руйнування ключових несучих елементів будівлі. Триповерховий блок зазнав повного

руйнування перекриттів, часткового знищення стін, значних деформацій покриттів, а також втрати функціональності основних інженерних систем. Двоповерховий блок виявлено з частковим руйнуванням залізобетонних плит перекриття, пошкодженням кладки стін, викривленням геометрії прорізів.

Окрему загрозу становили наскрізні тріщини в плитах перекриття, наявність раковин і відшарувань бетонного шару, що свідчило про зниження несучої здатності й потенційну втрату стійкості. У низці зон спостерігалось обуглення й осипання зовнішнього оздоблення, деформації віконних та дверних перемичок. Застосовані неруйнівні методи дозволили виявити критичне зниження міцнісних характеристик бетону (нижче ніж клас В15), що вказує на необхідність повного демонтажу окремих ділянок.

Класифікація технічного стану

Визначення категорії технічного стану будівельних конструкцій виконано відповідно до розділів 6–9 ДСТУ 9273:2024 [1], який встановлює єдині вимоги до оцінювання механічного опору та стійкості будівель і споруд. Згідно з цим стандартом, технічний стан об'єкта оцінювався за сукупністю критеріїв: ступенем фактичного пошкодження несучих елементів, рівнем деградації матеріалів та зменшенням залишкової несучої здатності.

Критеріями аварійного стану, відповідно до п. 8.4.2 ДСТУ 9273:2024 [1], були:

- 1) утворення наскрізних тріщин у плитах перекриття з втратою локальної стійкості;
- 2) значне зниження міцності бетонних елементів, зафіксоване неруйнівними методами (нижче за розрахунковий клас бетону В15);
- 3) порушення просторової жорсткості об'єкта внаслідок зсувів кладки та руйнування вертикальних елементів;
- 4) сукупна площа пошкоджених несучих конструкцій, що перевищує 60 %.

Оцінювання пошкоджень

Для формалізації результатів застосовано матрицю відповідності дефектів та рівня технічного стану, згідно з додатком Б ДСТУ 9273:2024 [1], де враховано види дефектів (тріснутий елемент, втрата перерізу, деструкція матеріалу) та ступінь їх поширення. Структурно-пошкоджений стан залізобетонних плит класифіковано за типом ЗК4 (повне порушення цілісності конструкції), а зовнішніх стін - за типом С2-С3, що вимагає комплексного підсилення або повного розбирання.

Формулювання остаточного висновку про технічний стан споруди виконано відповідно до п. 9.2.1 ДСТУ 9273:2024 [1], з чітким зазначенням:

- 1) категорії технічного стану;
- 2) площ пошкоджених елементів;
- 3) прогнозу залишкового ресурсу;

- 4) рекомендацій щодо подальших дій (підсилення, реконструкція, демонтаж).

У відповідності до класифікації з таблиці 2 ДСТУ 9273:2024, технічний стан будівлі визначено як аварійний, що унеможливило подальшу експлуатацію без проведення першочергових протиаварійних заходів.





Рис. 2. Руйнування скління, рам, перекриття, конструкцій покриття, зовнішнього опорядження 3-х поверхового блоку

Обґрунтування інженерних рішень

З урахуванням отриманих даних і на підставі комплексного обстеження, запропоновано наступні інженерні рішення:

- повний демонтаж триповерхового блоку як такого, що втратив несучу здатність;
- посилення елементів двоповерхового блоку шляхом влаштування нових несучих конструкцій (залізобетонні пояси, металеві обв'язки);
- реконструкція стін із застосуванням армованої кладки;
- заміна віконних і дверних заповнень, облаштування нових інженерних мереж;
- застосування сучасних вогнезахисних і протиударних матеріалів під час відновлення;
- запропоновано врахування вимог п. 8 ДСТУ 9273:202 [1], 4 щодо повторного обстеження після виконання ремонтних заходів і моніторингу стану конструкцій у процесі подальшої експлуатації.

Наукова новизна та практична значущість

Наукова новизна роботи полягає у формалізації методики обстеження конструкцій, пошкоджених засобами ураження, на основі поєднання нормативного підходу та інструментальної оцінки міцності матеріалів у післяаварійному стані. Запропоновано адаптований порядок виконання обстеження з урахуванням специфіки руйнувань, притаманних умовам збройного конфлікту (вибуховий імпульс, фрагментація, вторинні пожежі).

Практична значущість полягає в розробці типового алгоритму реагування, що може бути застосований у процесі відновлення об'єктів соціальної інфраструктури на деокупованих територіях. Застосування вказаного підходу дозволяє підвищити обґрунтованість технічних висновків, мінімізувати ризики прийняття помилкових рішень щодо експлуатації чи демонтажу об'єктів, а також оптимізувати кошториси ремонтних робіт.

Висновки

1. У результаті проведеного обстеження будівлі Харківського ліцею № 134 встановлено, що більшість її конструктивних елементів зазнали критичних пошкоджень і не відповідають мінімальним вимогам до механічної стійкості, визначеним ДБН В.1.2-14:2018 та ДСТУ 9273:2024.
2. Методика обстеження, що застосовувалась, показала ефективність при оцінюванні аварійного технічного стану за умов дії позапроектних навантажень комбінованого характеру (вибух, уламки, пожежа).
3. Запропоновано комплексний підхід до ухвалення інженерних рішень, який враховує ступінь ушкодження, наявність

прогресувального обвалення та техніко-економічну доцільність реконструкції.

4. Отримані результати можуть бути використані для розробки типових алгоритмів відновлення соціальної інфраструктури після бойових дій.

5. Потребує подальшого вдосконалення методика визначення залишкової несучої здатності окремих елементів за результатами неруйнівного контролю в умовах посттравматичних пошкоджень.

[1]. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану.

[2]. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів.

[3]. Постанова Кабінету Міністрів України від 12.04.2017 № 257 «Про затвердження Порядку проведення обстеження прийнятих в експлуатацію об'єктів будівництва».

[4]. Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 06.08.2022 р. №144 «Про затвердження Методики проведення обстеження та оформлення його результатів».

[5]. ДСТУ EN ISO 13385-1:2018 Технічні вимоги до геометричних параметрів продукції (GPS). Прилади для лінійних та кутових вимірювань. Частина 1. Штангенциркулі. Проектні та метрологічні характеристики.

[6]. ДСТУ 4179-2003 Рулетки вимірювальні металеві. Технічні умови (ГОСТ 7502-98, MOD). Зі зміною № 1 (ПС № 6-2005).

[7]. ДСТУ Б В.2.7-220:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю.

DEVELOPMENT OF A COMPREHENSIVE APPROACH TO THE ADOPTION OF ENGINEERING SOLUTIONS TO TAKE INTO ACCOUNT THE DEGREE OF DAMAGE AND THE PRESENCE OF PROGRESSIVE COLLAPSE OF BUILDINGS AND STRUCTURES FROM IMPACT OF IMPACT MEANS

The article presents the results of the inspection of the technical condition of buildings and structures damaged as a result of hostilities, in particular by the impact of weapons of destruction. Typical destructions, methods for their detection and assessment are considered, taking into account current regulatory documents. An example of a practical inspection of a public building of the Kharkiv Lyceum No. 134 of the Kharkiv City Council is presented, conclusions are drawn regarding the technical condition and suitability for further operation. A comprehensive diagnostic methodology is proposed, based on a combination of visual, instrumental and computational approaches.

УДК 544.77:66.063.6(063)

TOPOLOGICAL MODELING OF CHARACTERISTIC FEATURES OF STRUCTURE FORMATION KINETICS IN DISPERSE SYSTEMS

Trofimova L.E., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

It should be noted that the experimental results given in the references [1-5] indicate the existence of a number of similar kinetic curves, with their *N*-shaped course being identical to the loop on the Van der Waals isotherms. Ambiguous dependences of the deformation modulus E , the resonant frequencies ν and the ultimate shear stress P_m on time τ have been obtained, in particular, for aqueous dispersions of tricalcium silicate, cement-water dispersions with and without polymer additives, slips of ceramic radio-electronic materials, vulcanizers based on butyl rubber, filled with soot, cement or chalk. According to the authors, pronounced decays of kinetic activity indicators on graphic dependencies are the result of destructive processes in the systems under consideration. It is also noted that although the essence of the phenomena in progress is theoretically not clear enough due to the complexity of the objects under study, the structure formation processes can be influenced for a definite purpose through introduction of surface-active substances (SAS). As a result of applying the appropriate additives, the properties of the dispersions are stabilized, while the kinetic curves take on a monotonically increasing form. From the point of view of synergetics [6-8] and catastrophe theory [9-11], the characteristic features of the indicated dispersed systems are similar to the geometry of the «fold» catastrophe.

The data presented in the literature [1-5] indicate the existence of a certain group of graphs of the kinetics of structure formation, the *N*-shaped form of which (Fig. 1) is similar to the geometry of the canonical «fold» catastrophe (Fig. 2). The correspondence between the experimental and model graphical dependencies is manifested not only in the noted external similarity of the course of the curves, but also in their interpretation from the standpoint of the physicochemistry of dispersed systems [12, 13].

The explanation of the course of the curves describing the change in time of the modulus of rapid elastic deformation and the resonance frequency of aqueous suspensions of press powders containing magnesium oxide in [1] is associated with the specific behavior of MgO. Dispersions including this component are characterized by a low critical concentration of structure formation at which a coagulation structure arises and the binding properties of MgO are manifested similarly to cement-mineral mixtures. After several hours, a sharp strengthening of the system is observed due to the interaction of the surface of MgO particles with

water and the resulting formation of bonds between them in the form of OH - Mg - O - (MgO)_n - Mg - OH chains. Over time, such chains create a spatial framework and transform into condensation-crystallization structures, which is illustrated by an increase in the deformation modulus (Fig. 1, curve 1). A certain drop in the values of the kinetic parameters after 3.5 hours is explained [1] by the probable weakening of the suspension in the initial period of point contact formation. To prevent the formation of condensation-crystallization structures and maintain the stability of the rheological properties of the dispersions, it is necessary to limit the growth of structural chains and their interaction. The required effect is achieved by introducing 0.5 - 1.0% (from the mass of the solid phase) of citric acid C₃H₃O(COOH)₃ into the suspension, which enters into chemical interaction with the hydrated surface of magnesium oxide particles and its molecules present in the solution. Since the dissociation constant of citric acid is low, the reaction proceeds slowly. The resulting reaction products block the surface of the particles, which limits the formation of strengthening structures and determines the constancy of the system properties (Fig. 1, curve 2).

In light of the above, taking into account the regularities shown in Fig. 1, it is assumed that the «fold» catastrophe unites in one diagram two possible, in this case, qualitatively different «limit» variants of structure formation curves (Fig. 2). Such an interpretation does not contradict the physical meaning embedded in the standard model description.

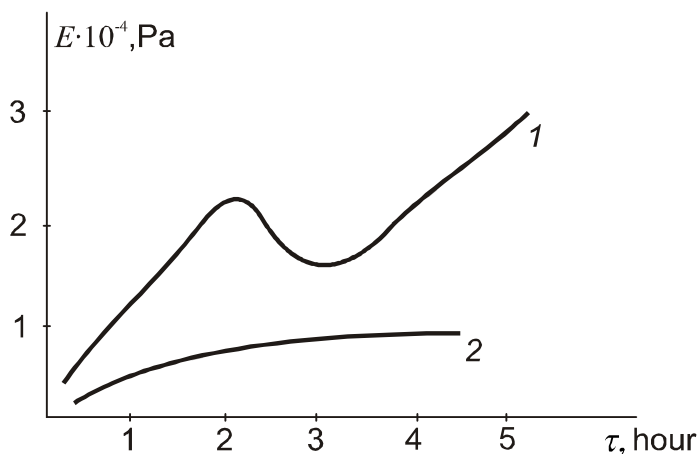


Figure 1. Curves of change in time τ of the modulus of rapid elastic deformation E of a MgO suspension: 1- without surface-active substances (SAS); 2 - with 1% content of citric acid

The three-dimensional model picture reproduces the peculiarities of changes in the indicators E , ν or P_m as functions of time (in terms of the theory being applied τ is the generalized coordinate) at various SAS concentrations (control parameter $C, \%$). The family of curves corresponding to different values of C in the order of its ascending have a configuration adequate to Van der Waals configuration. In the absence or minor content of the additive, dependencies have a maximum and minimum. As C increases, these points approach, and at a certain $C = C_{cr}$ value, similar to the Van der Waals critical temperature, merge into one. This concentration of the additive and the corresponding kinetic curve are interpreted as critical. The critical curve of structure formation rises monotonously throughout, except for one point, which is the inflection point of the graph which separates function of two qualitatively different types. A parabola formed by points of maxima, minima and inflection limits the region of thermodynamically unstable states of the system. It seems likely that the moment at which the fold points arise on the model surface correlates with destructive changes in the kinetic characteristics due to the self-organization processes in hardening systems.

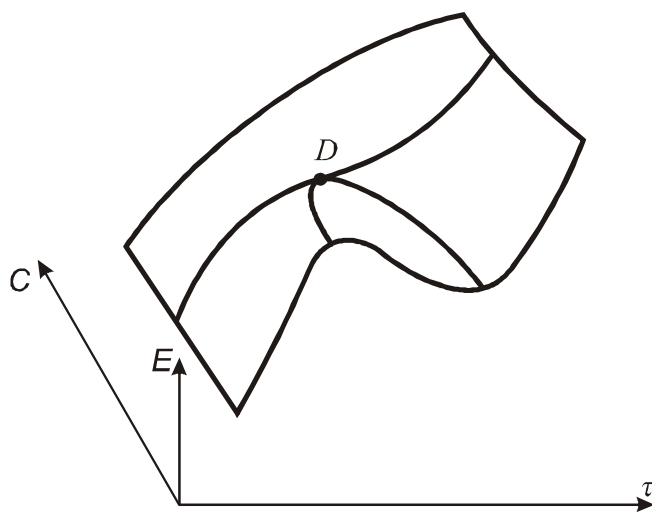


Figure 2. Transformation of the curves of change in time τ of the modulus of rapid elastic deformation E of MgO-containing suspension with increasing concentration C of citric acid («fold» model: D is the fold point)

Thus, the results of studies of the kinetics of structure formation presented in [1-5] are essentially a discussion of a special case of the catastrophe theory, and the considered model surface, while generalizing individual effects, clearly illustrates the qualitative structural rearrangements in the hardening dispersion.

Based on all of the above, it follows that regardless of the nature of the *N*-shaped kinks in the experimental graphs, their appearance is a natural result of general trends in the development of nonlinear systems.

- [1] A.A.Poliakov, N. N. Kruglickiy, Spray drying in the technology of radioelectronic materials [Raspylitel'naya sushka v tekhnologii radioelektronnykh materialov], Radio i svyaz, M., 1982.
- [2] N. N. Kruglickiy, A.D.Kuznetsov, Effect of filler on the structure formation of vulcanizers based on butyl rubber, in: Materials of the International Conference on Mechanics and Technology of Composite Materials, BAS, Sofia, 1979, pp. 281-284.
- [3] N. N. Kruglickiy, G.P. Boiko, Physicochemical mechanics of cement-polymer composites [Fizikokhimicheskaia mekhanika tsementnopolimernykh composition], Naukova Dumka, Kyiv, 1981.
- [4] M.M. Sychev, Physicochemical foundations of intensification of the use of chemical resources of binders in construction engineering [Fiziko-khimicheskiye osnovy intensifikatsii ispol'zovaniya v stroitel'noy tekhnike khimicheskikh resursov vyazhushchikh sistem], in: Materials of Conference on hydration and hardening of binders, Research Institute Promstroy, Ufa, 1978, pp. 70-75.
- [5] O.I. Lukyanova, N.G.Vasilieva, Study of hardening processes in coagulation gels of calcium hydrosilicates [Issledovanie protsessov uprochneniia v koagulyatsionnykh geliakh gidrosilikatov kaltsiia], Kolloidn. Zh. 32(3) (1970) 391-395.
- [6] G.Nicolis, I.Prigogine, Self-Organization in Nonequilibrium Systems, John Wiley & Sons, New-York, 1977.
- [7] H. Haken, Synergetiks. An introduction, 3 rd. edn., Springer, Berlin, 1983.
- [8] V.Sukhanov, V.Vyrovoy, O.Korobko, Material structure in structure construction [Struktura materiala v strukture konstruksii], OSACEA, Odesa, 2022/
- [9] R.Thom, Structural Stability and Morphogenesis, Benjamin, New York, 1972.
- [10] T.Poston, I.Stewart, Catastrophe Theory and its Applications, Pitman, London, San Francisco, 1978.
- [11] L.Trofimova, Modeling and optimization of technology and physics-mechanical properties of composite materials, Key Engineering Materials.864 (2020) 59-65.
- [12] N.B. Uriev, Ya.P. Ivanov, Structure formation and rheology of inorganic dispersed systems and materials [Strukturoobrazovanie i reologiya neorganicheskikh dispersnykh sistem i materialov], BAS, Sofia, 1991,
- [13] N.B. Uriev, Technology of Dispersed Systems and Materials: Physicochemical Dynamics of Structure Formation and Rheology. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH& Co. KGaA, 2017.

ТОПОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ КІНЕТИКИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМАХ

Розглянуті деякі особливості кінетики структуроутворення в дисперсних системах з позицій синергетики і теорії катастроф. Встановлено, що поява характерних N-зламів на кінетичних кривих таких сумішей інформативно описується і аналізується на основі стандартної моделі «складка». Показано, що згода між експериментальними і модельними кінетичними кривими полягає не лише в їх зовнішній схожості, але і в логічному узагальненні.

УДК 614.842

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МІКРОБІОЛОГІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ ДЕРЕВНО-ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТУ

Цапко Ю.В., д.т.н., проф.

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

Касянчук І.О., асп.

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

Бондаренко О.П., к.т.н., доц., Цапко О.Ю., PhD, старш. досл., доц.

Ющенко А.В., студ.

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

Бетонні та залізобетонні конструкції є основою будівництва завдяки їх Деревина є одним із найбільш поширених матеріалів у будівництві завдяки своїм властивостям, зокрема, міцності, низької теплопровідності та інших, що призводить до універсальності конструктивних рішень. Так одним з напрямлень використання деревини є застосування у якості теплоізоляційних матеріалів, які призначені для теплової ізоляції огорожувальних конструкцій будівель і споруд, технологічного обладнання та трубопроводів. Проте, як органічний матеріал, деревина піддається впливу навколишніх факторів, які руйнують її під час експлуатації. До основних факторів деструкції деревини можна віднести біологічне руйнування, що може діяти окремо або в поєднанні з іншими видами деградації, наприклад вологи [1-3].

Для зниження швидкості деструкції та раціонального використання деревини знайшли застосування деревно-полімерні композити, що є

перспективних напрямленням в області використання відходів деревообробного виробництва та низькосортної деревини, рослинних відходів та пластмас. У виготовленні деревно-полімерних композитів можуть використовуватися термопластичні полімери і їх суміші, зокрема, поліетилен, поліпропілен і полівінілхлорид. Для керування технологічним процесом деревно-полімерними композитами в їх склад вводять різні модифікатори: в'язучі, поверхнево-активні речовини, мастильні та температурні стабілізатори, пігменти, спінюючі агенти. Зокрема, в якості біологічних полімерів поширене застосування зернових крохмалів, відходів шкіряного та паперового виробництва тощо. В якості деревного наповнювача може використовуватись різні відходи деревообробних виробництв, а також, додатковим сировинним ресурсом є целюлозовмістні відходи сільськогосподарського виробництва та відновлювальні рослини такі як очерет, льон та ін.

Для деревно-полімерних композитів притаманні властивості дерева, але мають недоліки, зокрема, схильність до гниття і цвілі, горючість, тощо. Застосування екологічно безпечних речовин на основі синтетичних смол потребує проведення досліджень, як зміни структури поверхні деревини при формуванні деревно-полімерних композитів, так і впливу на стійкість виробів до умов експлуатації середовища.

Тому дослідження, що направлені на визначення закономірностей гальмування процесів біологічного проникнення деревно-полімерних композитів на основі синтетичних смол, є актуальними.

Аналіз експериментальних досліджень показує, що максимальна втрата маси в разі біоуруйнування зразків деревно-полімерних композитів на основі крохмалю склала до 15 % та відноситься до біоуруйнювної. Втрата маси зразків деревно-полімерних композитів на основі клею ПВА не перевищила 5 %, виготовлених з тирси і синтетичної смоли, була менше 1,5 %, що відносить їх до біостійких матеріалів. На рис. 1, табл. 1 показано результати досліджень стійкості деревно-полімерного композиту до стиску. Дослідження міцності на стиск після біодеструкції показало, що виріб з деревно-полімерного композиту на крохмалі та клеях ПВА крихкі. Так найнижчу міцність на стиск показав зразок на крохмалі з середнім значенням 0,1 МПа, трохи краще значення показав зразок на клею ПВА D3 – 0,98 МПа та зразок на клею ПВА D4 – 1,92 МПа. Про те для зразків на основі синтетичних смол міцність на стиск набагато вища та складає: для деревно-полімерного композиту на основі епоксидної смоли середнє значення 3,1 МПа та поліефірної смоли – 2,4 МПа. Відповідно деформація при стиску для виробу на основі епоксидної смоли перевищує значення для поліефірної смоли. При дослідженні процесу біодеструкції деревно-полімерного композиту, як витікає з отриманих результатів, закономірним є гальмування часу біодеструкції, що обумовлено

утворенням шару зі тирси та синтетичної смоли, яка є стійкою до дереворуйнівних грибів. Необхідно врахувати, що присутність тирси у деревно-полімерному композиті призводить до утворення теплозахисного шару стійкого до механічних коливань. Яке доводить про утворення заслону для проникнення дереворуйнівних грибів, що можливо ідентифікувати за методом біологічного впливу на зразки. Це означає, що врахування даного факту відкриває можливість для ефективного регулювання властивостями деревно-полімерного композиту безпосередньо в умовах серійного промислового виробництва.

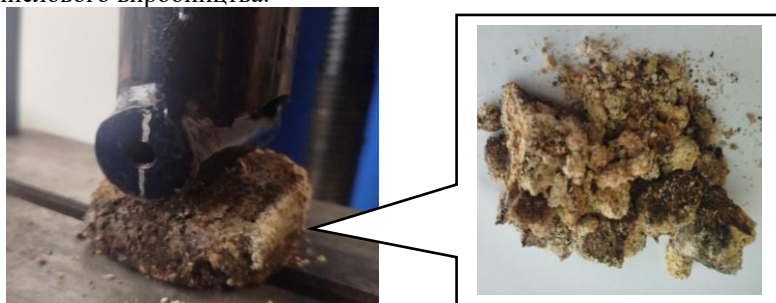


Рис. 1. Дослідження на міцність теплоізоляційних виробів з деревно-полімерного композиту

Аналіз експериментальних досліджень з визначення біостійкості деревно-полімерного композиту свідчить про гальмування процесів біодеградації матеріалу та стійкості при випробуваннях на міцність теплоізоляційних виробів з деревно-полімерного композиту (рис. 1, табл. 1).

Таблиця 1. Межа міцності зразків деревно-полімерного композиту на стиск після випробувань на біостійкість

№ зразка	Маса, m_0 , г	Розміри, мм			Навантаження, P_{max} , Н	σ , МПа	Деформація, мм
		b	h	d			
Виріб з тирси і крохмалю							
1	63,44	52,42	30,84	40,43	294,38	0,10	3,9
Виріб з тирси і клею ПВА D4							
1	28,82	42,49	56,01	37,90	2235,08	0,98	12,2
Виріб з тирси і клею ПВА D3							
1	48,27	36,04	65,01	29,72	2695,19	1,92	13,6
Виріб з тирси і епоксидної смоли							
1.1	14,32	48,56	25,16	25,31	2035,27	3,1	12,19
Виріб з тирси і поліефірної смоли							
2.1	12,83	48,01	35,02	20,01	1139,83	2,4	8,64

Це не розходиться з практичними даними, добре відомими з робіт [4, 5], автори яких, до речі, теж пов'язують ефективність біозахисту деревини з антипіренами. Але, на відміну від результатів, опублікованих в [6, 7], отримані дані щодо впливу синтетичних смол на процес гальмування біодеструкції, дозволяють стверджувати наступне:

– основним регулятором процесу є не стільки ізолювання від впливу повітря, але й формування значної кількості біоізоляції для проникнення мікроорганізмів, оскільки окремі засоби руйнуються під впливом біологічної дії;

– суттєвий вплив на процес захисту деревно-полімерного композиту при застосуванні синтетичної смоли здійснюється у напрямку утворення ізоляційного шару по всьому об'єму стійкого до руйнування під дією біологічних коливань виробу.

[1]. O. Bondarenko, S. Guzii, K. Zaharchenko, E. Novoselenko, Development of protective materials based on glass- and slag-containing portland cement structures, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (11) (2015) 41–47. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.56577.

[2]. Yu. Tsapko, O. Bondarenko, A. Tsapko, Research of the efficiency of the fire fighting roof composition for cane, *Materials Science Forum*, 968 MSF (2019) 61–67. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.968.61.

[3]. S. Park, T. H.-K. Kang, Behavior of Unbonded Post-Tensioned Concrete Slabs Exposed to Fire, *Structural Journal*, 120 (3) (2023) 217–229. DOI: 10.14359/51738512.

[4]. Yu. Tsapko, V. Kyrycyok, A. Tsapko, O. Bondarenko, S. Guzii, Increase of fire resistance of coating wood with adding mineral fillers, *MATEC Web of Conferences*, 230 (2018) 02034. DOI: 10.1051/mateconf/201823002034.

[5]. Yu. Tsapko, O. Bondarenko, O. Horbachova, S. Mazurchuk, N. Buyskikh, Research activation energy in thermal modification of wood, *E3S Web of Conferences*, 280 (2021) 07009. DOI: 10.1051/e3sconf/202128007009.

[6]. Y. Tsapko, I. Kasianchuk, R. Likhnyovskyi, A. Tsapko, V. Kovalenko, V. Nizhnyk, O. Bedratyuk, M. Sukhanevych, Determining thermal and physical characteristics of wood polymer material for pipeline thermal insulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (125)) (2023) 63–72. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289341>.

[7]. F.A. Rabbani, S. Yasin, T. Iqbal, M.E.M. Soudagar, M.A. Kalam, Lignocellulosic fiber reinforcement in PPRC composites: An analysis of structural and thermal enhancements, *PLoS ONE*, 19 (2024) e0309128.

RESEARCH OF THE PROCESS OF MICROBIOLOGICAL DESTRUCTION OF WOOD - POLYMER COMPOSITE

It has been established that in the process of biological action, the process of stability of wood-polymer composite consists in the use of materials with low biodegradation. The determination of the biological stability of wood-polymer composites show that the maximum mass loss in the case of biodegradation of samples of wood-polymer composites based on starch was up to 15% and refers to biodegradation. The mass loss of samples of wood-polymer composites based on PVA glue did not exceed 5%, made from sawdust and synthetic resin was less than 1.5%, which refers them to bioresistant materials. The study of the compressive strength after biodegradation showed that the product from wood-polymer composite on starch and PVA glues is brittle. So, the lowest compressive strength was shown by the sample on starch with an average value of 0.1 MPa, a slightly better value was shown by the sample on PVA glue D3 – 0.98 MPa and the sample on PVA glue D4 – 1.92 MPa. However, for samples based on synthetic resins, the compressive strength is much higher and is: for wood-polymer composite based on epoxy resin, the average value is 3.1 MPa and polyester resin – 2.4 MPa.

УДК 624.04

РОЗРАХУНОК СТЕРЖНЕВИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВРАХУВАННЯМ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ

Чучмай О.М., к.т.н., доц.

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Бетон і залізобетон - в даний час найрозповсюджені матеріали в будівництві. Удосконалення залізобетонних конструкцій більшою мірою залежить від вдосконалення нових методів розрахунку, які забезпечать надійність та зменшать трудомісткість. Тріщини є найпоширенішим дефектом у залізобетонних конструкціях [1-2]. Їх утворення залежить від багатьох причин – помилки при проектуванні, порушення технології виробництва та недотримання стандартів виготовлення, агресивний вплив навколишнього середовища та аварійні ситуації. Більшість залізобетонних конструкцій працюють із тріщинами, які кількісно, а іноді якісно змінюють напружено-деформований стан конструкції.

В роботі запропоновано методику розрахунку стрижневих конструкцій з тріщинами на основі методу переміщень. Розрахунок має ітераційний вигляд - на першій ітерації виконується розрахунок в пружній постановці та

визначаються згинальні моменти, на другій ітерації порівнюємо отримані згинальні моменти з моментом тріщиноутворення елемента конструкції та визначаємо довжини ділянок з тріщинами. Надалі виконуємо розрахунок конструкції, розглядаючи її елементи як балки змінної жорсткості.

Розглянемо балку змінної жорсткості із різними типами опорних закріплень (рис.1.).

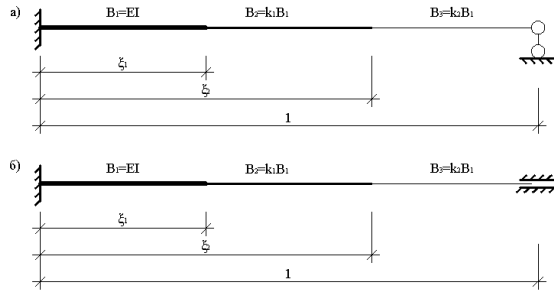


Рис.1. Балки змінної жорсткості з різними типами закріплень

Запишемо коефіцієнти, що враховують змінну жорсткість балки для різних типів опорних закріплень (табл. 1.).

де

$$\theta_1 = \frac{k_2}{k_2 - m_1(1 - \xi_1)^3 - m_2(1 - \xi_2)^3}$$

$$\eta_1 = \frac{1 + m_1(6 - 8\xi_1 + 3\xi_1^2)\xi_1^2 + m_2(6 - 8\xi_2 + 3\xi_2^2)\xi_2^2}{k_2 - m_1(1 - \xi_1)^3 - m_2(1 - \xi_2)^3};$$

$$\eta_2 = \frac{1 + m_1(2.4 - 1.2\xi_1 - 0.8\xi_1^2 + 0.6\xi_1^3) + m_2(2.4 - 1.2\xi_2 - 0.8\xi_2^2 + 0.6\xi_2^3)}{k_2 - m_1(1 - \xi_1)^3 - m_2(1 - \xi_2)^3};$$

$$\eta_3 = \frac{8 - 5\eta_2}{3};$$

$$\eta_4 = \frac{4}{3} \cdot \frac{0.75 + m_1(3 - 2\xi_1)\xi_1^2 + m_2(3 - 2\xi_2)\xi_2^2 - m_2(\xi_2 - 0.5)^2(5 - 4\xi_2)}{k_2 - m_1(1 - \xi_1)^3 - m_2(1 - \xi_2)^3};$$

$$\eta_5 = \frac{8}{11} \cdot \frac{1.5k_2 - 0.125 - 1.5[m_1(1 - \xi_1)^2 - m_2(1 - \xi_2)^2] - m_2(\xi_2 - 0.5)^2(2.5 - 2\xi_2)}{k_2 - m_1(1 - \xi_1)^3 - m_2(1 - \xi_2)^3}$$

Таблиця 1
 Значення згинальних моментів та опорних реакцій методу переміщень з
 урахуванням змінної жорсткості балки

№	Схема	Згинальні моменти	Опорні реакції
1		$M_A = \frac{3B_1}{l} \theta_1$	$V_A = V_B = \frac{3B_1}{l^2} \theta_1$
2		$M_A = \frac{3B_1}{l^2} \theta_1$	$V_A = V_B = \frac{3B_1}{l^3} \theta_1$
3		$M_A = \frac{ql^2}{8} \eta_1$ $M_{(0.5)} = \frac{ql^2}{16} (6 - 5\eta_2)$	$V_A = \frac{5}{8} ql \eta_2$ $V_B = \frac{3}{8} ql \eta_3$
4		$M_A = \frac{3}{16} Pl \eta_4$ $M_{(0.5)} = \frac{5}{32} Pl \eta_6$	$V_A = \frac{11}{16} F \eta_5$ $V_B = \frac{5}{16} F \eta_6$
5		$M_A = \frac{4B_1}{l} \theta_2; M_B = \frac{2B_1}{l} \theta_4$	$V_A = V_B = \frac{6B_1}{l^2} \theta_3$
6		$M_A = \frac{6B_1}{l^2} \theta_3$ $M_B = \frac{6B_1}{l^2} \theta_6$	$V_A = V_B = \frac{12B_1}{l^3} \theta_5$
7		$M_A = \frac{ql^2}{12} \eta_7$ $M_{(0.5)} = \frac{ql^2}{24} (12\eta_8 - 2\eta_7 - 3)$ $M_B = \frac{ql^2}{12} \eta_9$	$V_A = \frac{ql}{2} \eta_8$ $V_B = \frac{ql}{2} \eta_{10}$
8		$M_A = \frac{1}{8} Fl \eta_{11}$ $M_{(0.5)} = \frac{1}{8} Fl (2\eta_{12} - \eta_{11})$ $M_B = \frac{1}{8} Fl \eta_{13}$	$V_A = \frac{1}{2} F \eta_{10}$ $V_B = \frac{1}{2} F \eta_{14}$

$$\eta_6 = \frac{16 - 11\eta_5}{5};$$

$$\theta_2 = \frac{k_2 [1 + m_1 \xi_1^3 + m_2 \xi_2^3]}{k_2 [1 + m_1 \xi_1^3 + m_2 \xi_2^3] - [m_1 (1 - \xi_1)^4 + m_2 (1 - \xi_2)^4 - m_1 m_2 (\xi_2 - \xi_1)^4]};$$

$$\theta_3 = \frac{k_2 [1 + m_1 \xi_1^2 + m_2 \xi_2^2]}{k_2 [1 + m_1 \xi_1^3 + m_2 \xi_2^3] - [m_1 (1 - \xi_1)^4 + m_2 (1 - \xi_2)^4 - m_1 m_2 (\xi_2 - \xi_1)^4]};$$

$$\theta_4 = 3\theta_3 - 2\theta_2;$$

$$\theta_5 = \frac{k_2 [1 + m_1 \xi_1 + m_2 \xi_2]}{k_2 [1 + m_1 \xi_1^3 + m_2 \xi_2^3] - [m_1 (1 - \xi_1)^4 + m_2 (1 - \xi_2)^4 - m_1 m_2 (\xi_2 - \xi_1)^4]};$$

$$\theta_6 = 2\theta_5 - \theta_3;$$

$$\eta_7 = \frac{9[1 + m_1 \xi_1^2 + m_2 \xi_2^2] \cdot [1 + m_1 \xi_1^4 + m_2 \xi_2^4] - 8[1 + m_1 \xi_1^3 + m_2 \xi_2^3]^2}{k_2 [1 + m_1 \xi_1^3 + m_2 \xi_2^3] - [m_1 (1 - \xi_1)^4 + m_2 (1 - \xi_2)^4 - m_1 m_2 (\xi_2 - \xi_1)^4]};$$

$$\eta_8 = \frac{3[1 + m_1 \xi_1 + m_2 \xi_2] \cdot [1 + m_1 \xi_1^4 + m_2 \xi_2^4] - 2[1 + m_1 \xi_1^2 + m_2 \xi_2^2][1 + m_1 \xi_1^3 + m_2 \xi_2^3]}{k_2 [1 + m_1 \xi_1^3 + m_2 \xi_2^3] - [m_1 (1 - \xi_1)^4 + m_2 (1 - \xi_2)^4 - m_1 m_2 (\xi_2 - \xi_1)^4]};$$

$$\eta_9 = \eta_7 + 6(1 - \eta_8); \quad \eta_{10} = 2 - \eta_8;$$

$$\eta_{11} = \frac{8[1 + m_1 (3 - 2\xi_1)\xi_1^2 + m_2 (3 - 2\xi_2)\xi_2^2][0.25 + m_2 (\xi_2 - 0.5)^2] - [1 + m_1 \xi_1^2 + m_2 \xi_2^2][0.125 + m_2 (\xi_2 - 0.5)^2 (2.5 - 2\xi_2)]}{k_2 [1 + m_1 \xi_1^3 + m_2 \xi_2^3] - [m_1 (1 - \xi_1)^4 + m_2 (1 - \xi_2)^4 - m_1 m_2 (\xi_2 - \xi_1)^4]};$$

$$\eta_{12} = \frac{2\{3[1 + m_1 (2 - \xi_1)\xi_1 + m_2 (2 - \xi_2)\xi_2][0.25 + m_2 (\xi_2 - 0.5)^2] - 2[1 + m_1 \xi_1 + m_2 \xi_2][0.125 + m_2 (\xi_2 - 0.5)^2 (2.5 - 2\xi_2)]\}}{k_2 [1 + m_1 \xi_1^3 + m_2 \xi_2^3] - [m_1 (1 - \xi_1)^4 + m_2 (1 - \xi_2)^4 - m_1 m_2 (\xi_2 - \xi_1)^4]};$$

$$\eta_{13} = 4(1 - \eta_{12}) + \eta_{11}; \quad \eta_{14} = 2 - \eta_{12};$$

$$m_1 = k_2 - \frac{k_2}{k_1}; \quad m_2 = \frac{k_2}{k_1} - 1.$$

Використовуючи цю методику, було виконано розрахунок плоскої рами [3], при врахуванні змінної жорсткості елементів конструкції зусилля знижуються приблизно на 20-25 %.

1. Конструкції будинків і споруд . Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст]: ДСТУ Б В.2.6-156:2010 // Мінрегіонбуд України . - К., 2011.

2. Улицкий, И. И. Теория и расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом длительных процессов [Текст] / И. И. Улицкий. К.: Будівельник, 1967. – 347 с.

3. Яременко А.Ф., Чучмай А.М. Влияние продольно-поперечного изгиба и трещинообразования на усилия, возникающие в железобетонных неразрезных пролетных строениях автодорожных мостов. – Київ, НБІБК, вип.67, 2007. – 764-770 с.

CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH ACCOUNTING FOR CRACKING

The paper proposes a method for calculating cracked rod structures based on the displacement method. The calculation has an iterative form. Let us consider a beam of variable stiffness with different types of support anchorages.

УДК 624.011.1

КОНСТРУЮВАННЯ ЖОРСТКИХ З'ЄДНАНЬ У ЗБІРНИХ КЛЕЄДОЩАТИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Чучмай С.М., к.т.н., доц.

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

В Україні останніми роками помітно зросла кількість підприємств, які освоїли виробництво двотаврових дерев'яних балок. Це зменшує імпортування таких виробів, на наш будівельний ринок заповнюється легкими та ефективними конструкціями власного виробництва. Однак такі досягнення насторожують у зв'язку із збільшенням випадків відмови балок при роботі в межах розрахункового навантаження.

Розглянута проблема представляє інтерес при проектуванні конструкцій балок найширшого профілю, а також конструктивних рішень складних форм (наприклад, оболонки різних типів - куполи, збірні гіперболічні оболонки та ін.) В роботі розглядаються конструктивні рішення жорстких вузлових з'єднань для нового класу армованих клеєдощатих конструкцій.

Одним з найбільш просунутих конструктивних рішень жорсткого з'єднання збірних елементів, що працюють на згин, слід вважати з'єднання системи ЦНДІБК [1], [2]. Протягом багатьох років під керівництвом проф., д.т.н. С.Б. Турковського з'єднання типу ЦНДІБК використано в десятках конструкцій у т.ч. для з'єднань із клеєного шпону [3] (рис.1).

Конструктивна схема з'єднання забезпечує спільну роботу дерев'яних елементів, що з'єднуються, сталевих закладних деталей стиснутої і розтягнутої зон стрижнів поперечного армування, сполучних накладок і ребр

жорсткості. Сполучні накладки та ребра жорсткості встановлюються на будівельному майданчику, а решта елементів стику виконуються заздалегідь.

У розвитку вузла “система ЦНДІБК” під керівництвом проф., д.т.н. В.В. Стоянова на кафедрі МД та ПК ОДАБА було розроблено нове конструктивне рішення [4], яке дозволяє суттєво знизити матеріаломісткість вузла та одночасно підвищити його ступінь збірності за меншої трудомісткості виготовлення (Рис.2,а). Принципова відмінність полягає у використанні зварного двотавра (рис. 2,б), половина якого встановлюється в одному з елементів, що з'єднуються на заводі при виготовленні, а потім до другої половини двотавра при монтажі кріпиться наросхуваний елемент.

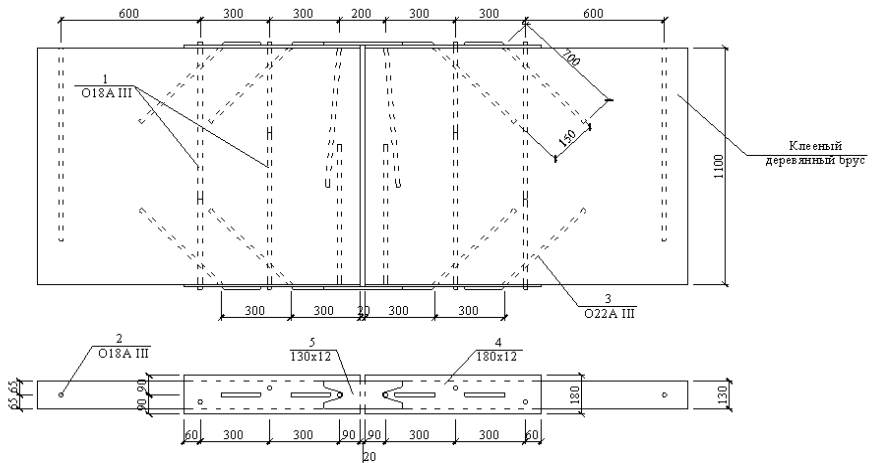


Рис.1. Вузлове з'єднання клеєдошлатих елементів перетином 130х1100 мм розроблене в ЦНДІБК під керівництвом С.Б. Турковського
1 – вклеєні анкерні стрижні Ø18 мм; 2 – вклеєні стрижні Ø18 мм; 3 – похилі вклеєні стрижні Ø18 мм; 4 – анкерні пластини 750х180 мм;

Також в лабораторії кафедри МД та ПК ОДАБА вузлове з'єднання типу "система ЦНДІБК" було вперше реалізовано при з'єднанні двотаврових балок зі стінкою з OSB [5] (Рис.3). У таких конструкціях обмежена висота поясу (близько 4см) та незначна товщина стінки, тобто відсутня можливість прямого влаштування такого стику. Для влаштування вклеєних стрижнів в торцях елементів, що з'єднуються стінка балки була розширена парними дерев'яними накладками на клею до ширини поясів.

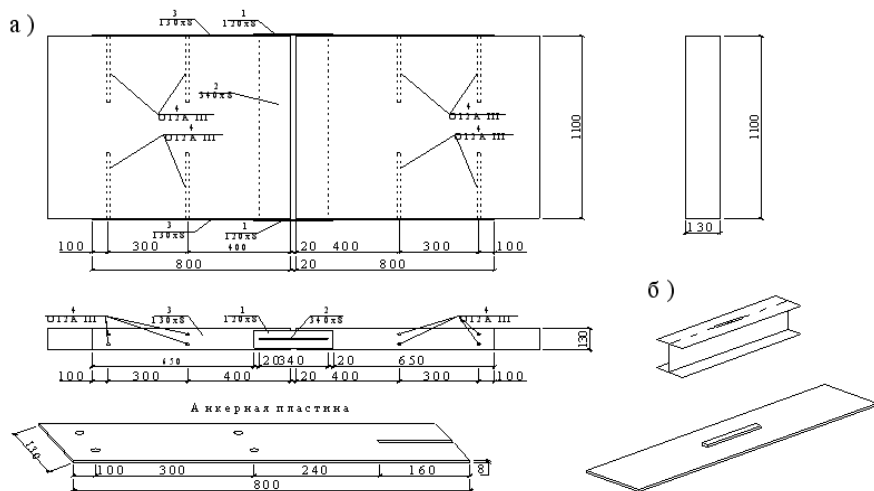


Рис.2. Вузлове з'єднання клеєдощатих елементів перетином 130x1100 мм розроблене на каф. МД та ПК ОДАБА під керівництвом В.В. Стоянова

а) конструктивна схема з'єднання: 1 – сполучна пластина (полиця) 120x340 мм, 2 – сполучна пластина (стінка) 320x1115 мм, 3 – анкерна пластина 130x800 мм, 4 – анкерні стрижні $\varnothing 12$ мм; б) зварний двотавр.

Експериментальні дослідження підтвердили високу здатність таких стиків двотаврових елементів. При розрахунковій навантаженні $P=16$ кН експериментальний результат виявився близьким до розрахункової величини. Зокрема прогин у центрі склав 5 мм ($1/300L$) при розрахунковій величині 5,2 мм, нормальні напруги при розрахунковому навантаженні виявилися близько 10 МПа при розрахунковій величині 10,4 МПа. Ознаки руйнування з'явилися тільки при навантаженні, що майже втричі перевищує розрахункову – 44 кН.

Зазначимо, що технологічні проблеми пошарового армування, а також удосконалення нових конструктивних рішень стиків вимагають додаткових експериментальних досліджень, але, безперечно, цей перспективний напрямок враховуючи зростаючі можливості у зв'язку з бурхливим зростанням у світі нанотехнологій.

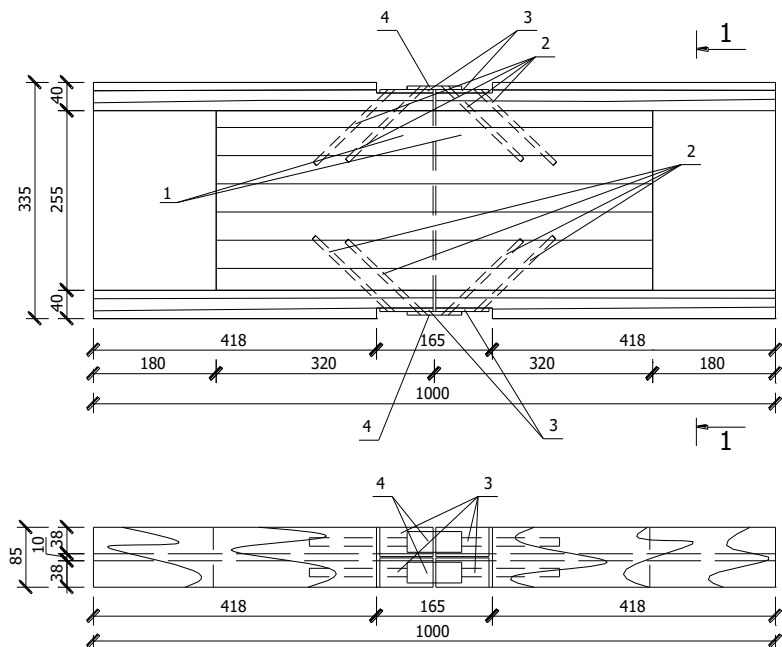


Рис.3. З'єднання двотаврової балки на вкесних стрижнях.

1-клеєдощата накладка; 2 - металеві стрижні Ø12 мм; 3 – металева накладка 80х40х5;
 4 – металева накладка 80х35х5

1. А.с. 857379 СССР. «Стыковые соединения клееных деревянных конструкций, ЦНИИСК» С.Б. Турковский и др. (Бюллетень изобретений №36, 1981)
2. Ковальчук Л.Н., Турковский С.Б. и др. «Деревянные конструкции в строительстве». М. Стройиздат 1995.
3. А.с. 1105586 СССР «Стыковое соединение клееных деревянных конструкций, ЦНИИСК» Турковский С.Б., Курганский В.Г. и др. Бюллетень изобретений №25, 1984.
4. Патент №26176 «Способы соединения деревянных конструкций» бюллетень №14 от 10.09.2007 Стоянов В.В., Чучмай С.М. и др.
5. Стоянов В.В., Чучмай С.М., Дорожкин В.В., Щелков А.В. «Конструирование стыков сборных клеёнодощатых элементов большепролетных конструкций» В сб.науч. трудов «Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс» т.2, ВСР 2007г.

DESIGNING RIGID CONNECTIONS IN PREFABRICATED GLUED BOARD STRUCTURES

The paper considers design solutions for several rigid nodal connections of prefabricated elements of rectangular and I-section glued-board structures. An analysis of experimental data and a numerical calculation of several types of nodal connections for larger-sized TsNIISK structures and a new connection with a welded I-beam are performed.

УДК 530.18+517.987+550.388

НЕТРИВІАЛЬНІ ЕФЕКТИ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ ПРИ ІНФОРМАЦІЙНОМУ АНАЛІЗІ ФІЗІОЛОГІЧНИХ СИГНАЛІВ МЕХАТРОННИМИ СИСТЕМНИМИ КОМПЛЕКСАМИ КЕРУВАННЯ. І

Шамич О.М., д-р. псих. наук, професор

Київський Національний університет будівництва і архітектури

Холодова О.С., старший викладач

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», м.Київ

Човнюк Ю.В., к. т. н., доцент, Чередніченко П.П., доцент,

Остапущенко О.П., к. т. н., доцент

Київський Національний університет будівництва і архітектури

Гамільтонівські системи у загальному випадку є «носіями хаосу» [1]. Це означає, що при деяких мінімальних обмеженнях фазовий простір довільної динамічної гамільтонівської системи має деякі області, всередині котрих відбувається рух з перемішуванням. Обмеження, які пов'язані, головним чином, з розмірністю системи, лежать в основі генерації саме процесу перемішування. Вказана розмірність повинна мати не менше $3/2$ ступенів вільності руху, тобто $N \geq 3/2$. Будемо припускати надалі, що час як частина ступіня вільності руху є циклічною змінною. Інакше кажучи, якщо гамільтоніан деякої механічної системи явно залежить від часу, тоді ця залежність є періодичною.

Співіснування у фазовому просторі областей стійкості (стійкої динаміки) та областей хаосу є одним з найбільш дивовижних та неочікуваних відкриттів [2]. Саме ця обставина дозволяє проаналізувати, як зароджується хаос і як виглядає мінімальна область хаосу. Хоча на велику кількість питань

тут ще немає чітких відповідей, проте зараз зрозуміло, що зародками хаосу є стохастичні прошарки, що утворюються у околі зруйнованих сепаратрис. Стохастичний прошарок був вперше описаний у роботі [3] при вивченні задачі про стійкість й руйнування магнітних поверхонь, а у [4] були отримані різноманітні оцінки його ширини. Подальше узагальнення цих результатів показало, що існує універсальність та непереборність (irreducibility) стохастичного прошарку при збуренні нелінійного маятника [1,2]. У даному дослідженні розглянуте важливе питання, яке виникло у період ескалації комп'ютерних методів для розв'язку різноманітних задач природознавства, зокрема, у задачах інформаційного аналізу фізіологічних сигналів сучасними мехатронними комплексами керування (до складу останніх входить комп'ютерний блок, що обробляє інформацію, яка надходить від різноманітних давачів/сенсорів, розміщених на тілі людини/спортсмена). В основі чисельного аналізу як правило лежать різницеві схеми, й саме це примушує нас переходити від диференціальних рівнянь до рівнянь у скінченних різницях, які адекватно (тільки на перший погляд!) описують динамічні процеси, що відбуваються у досліджуваному об'єкті.

Розглянемо далі на прикладі рівняння руху нелінійного маятника основні нетривіальні ефекти дискретизації для задач нелінійної динаміки механічних систем.

Так, рівняння руху маятника має вигляд:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 \cdot \sin x = 0, \quad (1)$$

й у найпростішому варіанті замінюється рівнянням:

$$x_{n+1} - 2x_n + x_{n-1} + \omega_0^2 \cdot (\Delta t)^2 \cdot \sin x_n = 0. \quad (2)$$

Тут, у (2), Δt – довжина (тривалість) інтервалу часу, яка є елементарним кроком різницевої схеми, й:

$$x_n = x(n\Delta t). \quad (3)$$

Для підвищення точності обчислень обирають, як правило, дуже малі значення Δt , щоб виконувалась нерівність:

$$K = \omega_0^2 \cdot (\Delta t)^2 \ll 1. \quad (4)$$

Виникає питання: у якій мірі можна контролювати помилки при переході від задачі (1) до задачі (2)? Це питання має доволі давню історію. Вже при перших чисельних моделюваннях нелінійних фізичних задач (у т.ч. задач нелінійної механіки, нелінійної динаміки механічних систем) почалось обговорення того, які властивості втрачаються й що нове з'являється від введення дискретизації у неперервну задачу [5]. У значній мірі відповідь на подібні питання стала можливою лише після того, як стало зрозумілим, що у (механічних) динамічних системах можливий хаос. Приклад дискретизації

рівняння (1) дозволяє з'ясувати один універсальний та нетривіальний ефект дискретизації.

Позначимо:

$$p_n = \frac{1}{\Delta t} \cdot (x_n - x_{n-1}). \quad (5)$$

Перепишемо (2) та (5) у вигляді сумісної системи:

$$\begin{cases} p_{n+1} = p_n - \omega_0^2 \cdot \Delta t^2 \cdot \sin x_n, \\ x_{n+1} = x_n + \Delta t \cdot p_{n+1}, \end{cases} \quad (6)$$

де використане позначення (4). Відображення (6) співпадає зі стандартним відображенням, наведеним у [1], так званим відображенням Чірікова-Тейлора, яке виникає у багатьох задачах фізики [6,7]. Саме ця обставина одразу дозволяє сформулювати низку результатів. Фазовий простір системи (1) складається тільки з інваріантних кривих. Навпаки, фазовий простір системи (6) має необмежене число стохастичних прошарків за доволі малих значень K .

Підкреслимо, що перехід до дискретних рівнянь є еквівалентним додаванню зовнішньої періодичної сили. Слід зазначити, що відображення (6) породжується гамільтоніаном:

$$H = \frac{1}{2} \cdot I^2 - K \cdot \cos \theta \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \cos(mvt), \quad (7)$$

де: I – дія, θ – кут. При цьому, (6) виникає з (7), якщо у останньому покласти $I = p \cdot \Delta t$, $\theta = x$, тобто:

$$H = \frac{1}{2} \cdot p^2 - \omega_0^2 \cdot \cos x \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \cos(mvt), \quad v = \frac{2\pi}{\Delta t}. \quad (8)$$

Враховуючи нерівність (4), обмежимося у (8) тільки членами з $m = 0; \pm 1$. Це дає:

$$H = H_0 + V_{discr.}, \quad (9)$$

де:

$$H_0 = p^2 / 2 - \omega_0^2 \cdot \cos x, \quad V_{discr.} = -2\omega_0^2 \cdot \cos x \cdot \cos(vt). \quad (10)$$

З цих формул (9), (10) бачимо, що H_0 є гамільтоніаном вихідного рівняння (1), а $V_{discr.}$ – потенціал збурення, обумовленого дискретизацією. Саме він призводить до утворення стохастичного прошарку [1] з відносною шириною:

$$\frac{\delta E}{E_s} = \max \left| \frac{E - E_s}{E_s} \right| = \frac{(4\pi)^4}{2\sqrt{K}} \cdot \exp \left(-\frac{\pi^2}{\sqrt{K}} \right), \quad (11)$$

де: $E_s = \omega_0^2 = K$,

або:

$$\frac{\delta E}{E_s} = \frac{\delta E}{\omega_0^2} = \frac{(4\pi)^4}{2\omega_0 \Delta t} \cdot \exp \left(-\frac{\pi^2}{\omega_0 \Delta t} \right). \quad (12)$$

Саме цей простий вираз (12) відображає нову якісну сторону дискретизації.

Вище було розглянуте тільки деяке перше наближення, яке передає грубу структуру фазового портрету динамічної системи. У дійсності, в усіх вікнах та острівках фазового портрету динамічної системи існує необмежене число «сепаратрисних намист» та стохастичних прошарків більш високого порядку. Саме вони утворюють у цілому незвично складний фрактальний орнамент, який важко описати. Спроба такого опису зроблена у другій частині дослідження.

Зазначимо наступне: потенціал дискретизації $V_{discr.}$ є високочастотним $\left(\nu = \frac{2\pi}{\Delta t} \gg \omega_0 \right)$, однак амплітуда його того ж порядку, що й амплітуда незбуреного потенціалу. Усі поправки завдяки $V_{discr.}$ малі, так само як малі поправки високочастотних збурень. Але це твердження залишається справедливим лише для збурень інваріантних кривих, які розміщені віддалік від сепаратрис. У околі сепаратрис вплив $V_{discr.}$ призводить до якісно нової динаміки – до стохастичної нестійкості. При високій розмірності задачі, яка вирішується, весь фазовий простір покривається мережею стохастичних прошарків на місці зруйнованих сепаратрис. Наявність такої сітки (мережі, каркасу та ін.) може призводити до суттєвих відмінностей дискретної задачі від неперервної.

- [1] Заславский Г.М., Сагдеев Р.З., Усиков Д.А., Черников А.А. Слабый хаос и квазирегулярные структуры. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991 240 с.
- [2] Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 368 с.
- [3] Filonenko N.N., Sagdeev R.Z., Zaslavsky G.M.// Nuclear Fusion. 1967. V.7. P.253.
- [4] Заславский Г.М., Филоненко Н.Н. // Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ). 1968. Т. 54. С. 1540.
- [5] Улам С.М. Нерешенные математические задачи. – М.: Наука, 1964. 180 с.

- [6] Заславский Г.М. Стохастичность динамических систем. – Наука, 1974. 271 с.
[7]. Лихтенберг А., Либман М. Регулярная и стохастическая динамика. – М.: Мир, 1984. 528 с.

**NON-TRIVITAL EFFECTS OF DISCRETIZATION IN INFORMATION
ANALYSIS OF PHYSIOLOGICAL SIGNALS BY MECHATRONIC CONTROL
SYSTEM COMPLEXES. I**

УДК 517.987+550.388+681.5

**НЕТРИВІАЛЬНІ ЕФЕКТИ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ ПРИ
ІНФОРМАЦІЙНОМУ АНАЛІЗІ ФІЗІОЛОГІЧНИХ
СИГНАЛІВ МЕХАТРОННИМИ КОМПЛЕКСАМИ
КЕРУВАННЯ. II.**

Шамич О.М., д-р. псих. наук, професор

Київський Національний університет будівництва і архітектури

Холодова О.С., старший викладач

Інститут соціальних технологій, Відкритий міжнародний
університет розвитку людини «Україна», м.Київ

Човнюк Ю.В., к. т. н., доцент,

Чередніченко П.П., доцент, Остапущенко О.П., к. т. н., доцент

Київський Національний університет будівництва і архітектури

В першій частині роботи було розглянуте деяке перше наближення, що передає лише грубу структуру фазового портрету інформаційно-вимірювальної системи, призначеної для інформаційного аналізу фізіологічних сигналів людського тіла (зокрема, тіла спортсмена високої кваліфікації), які реєструються мехатронними комплексами. У дійсності, в усіх вікнах і острівках вказаного фазового портрету існує необмежене число «сепаратрисних намист» та стохастичних прошарків більш високого порядку. Саме вони утворюють в цілому надзвичайно складний фрактальний орнамент, котрий у даному дослідженні буде описаний на основі дискретизації подібних сигналів, що мають фрактальну структуру. Зокрема, розглянута дискретизація масштабно-інваріантної фрактальної функції Вейерштрасса-Мандельброта. Пропонується узагальнення теореми Котельнікова для функції Вейерштрасса-Мандельброта, використовуючи спеціальну функцію Міттаг-Леффлера.

В останні 30-40 років зростає популярність та успіхи застосування концепції фракталу. Поняття фракталу первісно введене Мандельбротом [1] для опису складних геометричних об'єктів, які вимагають використання геометрії дробової розмірності (міра Хаусдорфа-Безіковича), у подальшому знайшло широке застосування у різних розділах теоретичної та прикладної фізики (і, зокрема, механіки) [2-10].

При розгляді хвильових полів у межах концепції фрактала [6] можна виділити дві групи задач. До першої групи відносяться дослідження розповсюдження хвиль у фрактальних структурах, коли фрактал є середовищем розповсюдження. Друга група задач відноситься до дослідження розсіювання, коли хвиля розповсюджується у однорідному середовищі із зануреними у нього фрактальними неоднорідностями. Наприклад, у роботі [11] проведений фрактальний аналіз короткохвильових сигналів, розсіяних дрібномасштабними неоднорідностями, й показано, що на відміну від традиційних методів спектрального аналізу фрактальний аналіз дозволяє діагностувати тип (природної, штучної) дрібномасштабної турбулентності. У обох розглянутих вище випадках у кінцевому підсумку маємо хвильове поле з фрактальною структурою.

Хвильові поля з фрактальною структурою представляють особливий інтерес для теорії інформації, математичної теорії зв'язку, зокрема, й для інформаційного аналізу сигналів фізіологічної природи, які фіксуються, зберігаються та обробляються сучасними мехатронними комплексами. У рамках концепції фрактала розвивається система ефективних алгоритмів архівації. Завдяки самоподібності сигналу з фрактальною структурою з'являється можливість детальної ідентифікації структури шуму й передачі інформації практично при будь-якому його рівні.

Загальний аналіз довільного хвильового поля з фрактальною структурою зараз відсутній. У цілому для опису властивостей систем з фрактальною структурою необхідний широкий клас функцій, який включає поряд з регулярними функціями, які складаються у суму з деяким ступенем, безперервні, але ніде не диференційовані функції, та клас узагальнених функцій.

У даній роботі на прикладі конкретної функції Вейерштрасса-Мандельброта [2], яка описує сигнал з фрактальною структурою (типова форма подання інформації про фізіологічні сигнали організму/тіла людини (спортсмена)), дається узагальнення першої теореми Котельнікова [12].

Функція Вейерштрасса-Мандельброта має вигляд:

$$W(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \frac{1 - \exp(i \cdot b^n \cdot t)}{b^{(2-D) \cdot n}} \cdot \exp(i \cdot \varphi_n) \right\}, \quad (1)$$

де: D – розмірність фрактала ($1 < D < 2$), φ_n – довільна фаза, b – параметр подібності.

Функція Вейерштрасса-Мандельброта безперервна, але ніде не диференційована. Для подальшого аналізу покладемо $\varphi_n = 0$ й розглянемо функцію:

$$C(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{b^{(2-D)n}} \right) - \operatorname{Re} W(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\cos(b^n \cdot t)}{b^{(2-D)n}} \right). \quad (2)$$

Для D , близьких до 1, функція (2) гладка; для D , близьких до 2, починає сильні флуктуації й нагадує шум у електричних ланцюгах [2] мехатронних комплексів, що входять до складу інформаційно-вимірювальних систем фізіологічних сигналів. Розглянемо далі можливість дискретизації функції (2). Функцію $\cos(b^n \cdot t)$ можна подати у вигляді:

$$\cos(b^n \cdot t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} D_{kn} \cdot \left\{ \frac{\sin[\omega_n(t - \pi \cdot k/\omega_n)]}{(t - \pi \cdot k/\omega_n)} \right\}, \quad (3)$$

де:

$$\omega_n = c \cdot b^n, \quad c > 1, \quad D_{kn} = \frac{1}{\omega_n} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot k \cdot b^n}{\omega_n}\right). \quad (4)$$

Тут t та ω_n – безрозмірні час й частота, котрі зв'язані з реальним часом τ й частотою Ω_n співвідношеннями: $t = \tau/t_0$, $\omega_n = \Omega_n/\omega_0$, де t_0 й ω_0 – деякі характерні час й частота, виходячи з характерних часів й частот процесу, що вивчається, та необхідної точності дискретизації сигналу. Таким чином, для (2) має місце розклад:

$$C(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{D_{kn}}{b^{(2-D)n}} \right) \cdot \left\{ \frac{\sin[\omega_n \cdot (t - \pi \cdot k/\omega_n)]}{(t - \pi \cdot k/\omega_n)} \right\}. \quad (5)$$

Кожна складова у виразі (5) аналогічна розкладу функції у відповідності до першої теореми Котельнікова [12]. Однак існує наступна принципова відмінність, що пов'язана з особливостями функції Вейерштрасса-Мандельброта. Функція (2) самоподібна (точніше, самоафінна [2]); $C(b^n \cdot t) = b^{(2-D)n} \cdot C(t)$. Вираз (5) для функції $C(t)$ також

самоподібний. На практиці, при аналізі сигналу обмежуються деяким граничним значенням частоти. Розглянемо далі обмежений за n ряд:

$$C_{-N}^M(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-N}^M \left(\frac{D_{kn}}{b^{(2-D) \cdot n}} \right) \cdot \left\{ \frac{\sin[\omega_n \cdot (t - \pi \cdot k / \omega_n)]}{(t - \pi \cdot k / \omega_n)} \right\}. \quad (6)$$

Для розкладу (6) також має місце модифіковане співвідношення самоподібності:

$$C_{-N}^N(b^n \cdot t) = b^{(2-D) \cdot n} \cdot C_{-N+n}^{N+n}(t). \quad (7)$$

За допомогою (7) можна визначити вираз для фрактальної розмірності $\gamma = 2 - D$, $0 < \gamma \leq 1$:

$$\gamma = \frac{1}{n} \cdot \log_b \left[\frac{C_{-N}^N(b^n \cdot t)}{C_{-N+n}^{N+n}(t)} \right]. \quad (8)$$

Функцію Вейерштрасса-Мандельброта можна використати для отримання випадкових фрактальних кривих, вважаючи параметри D та b функціями часу. Як випливає з (7), властивість самоподібності дозволяє за допомогою заміни $t \rightarrow b^n \cdot t$ здійснити дискретизацію тонкої структури функції, яка лежить за межами чутливості приладів. Зазначимо, що розглянуті особливості дискретизації функції з фрактальною структурою можуть лежати у основі різноманітних процедур стиснення інформації.

Насамкінець, наведемо один узагальнений вид виразу (5) для функції Вейерштрасса-Мандельброта за допомогою спеціальної функції Міттаг-Лефлера [13]:

$$E_{\alpha, \beta}(-z^\alpha) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{z^{2n}}{\Gamma(\alpha \cdot n + \beta)}, \quad (9)$$

де: $\Gamma(x)$ – гамма-функція Ейлера. Зазначивши, що:

$$E_{2,1}(-z^2) = \cos z, \quad E_{2,2}(-z^2) = \sin z / z,$$

можна здійснити узагальнення виразу (5):

$$C(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{b^{(2-D) \cdot n}} \right) \cdot E_{\alpha, \alpha-1} \left[-(\pi k b^n / \omega^n)^\alpha \right] \times \\ \times E_{\alpha, \alpha} \left[-(\omega_n \cdot (t - \pi k b^n / \omega^n))^\alpha \right]. \quad (10)$$

Вираз (10) перейде у (5) при $\alpha = 2$ ($1 < \alpha \leq 2$). Для інших α ми маємо нетривіальне узагальнення співвідношення (5), коли розклад здійснюється не тільки за періодичними, але й за неперіодичними функціями. У результаті вдається отримати аналог вейвлет-розкладу з подальшим використанням засобів вейвлет-аналізу.

- [1] Mandelbrot. The fractal geometry of nature – New York, 1982.
- [2] Федер Е. Фрактали. –М.: Мир, 1991. 254 с.
- [3] Нигматуллин Р.Р. // Теоретическая и математическая физика. 1992. Т. 90, №3. С. 354.
- [4] Кубарев Ю.Г. // Изв. АН. Серия физич. 1993. Т. 57, №3. С. 129.
- [5] Олемской А.И., Флат А.Я. // Успехи физических наук. 1993. Т.163, №12. С. 1.
- [6] Зосимов В.В., Лямшев Л.М. // Успехи физических наук. 1995. Т.165, №4. С. 361.
- [7]. Чукбар К.В. // Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ). 1995. Т 108, №5. С. 1875.
- [8]. Мейланов Р.П. // Письма в Журнал технической физики. 1996. Т.22, №23. С. 40.
- [9]. Мейланов Р.П., Садыков С.А. // Журнал теоретической физики (ЖТФ). 1999. Т 69, №5. С. 128.
- [10]. Мейланов Р.П. // Инженерно-физический журнал. 2001. Т.74, №2. С.1.
- [11]. Булгаков С.А., Пономаренко П.В., Ямпольский Ю.М. // Известия вузов. Радиофизика. 1995. Т.38, №6. С.557.
- [12]. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи. Издание Ред. Упр. связи РККА, 1933.
- [13]. Джарбашян М.М. Интегральные преобразования и представление функций в комплексной области. – М.: Наука, 1966. 672 с.

NON-TRIVIAL EFFECTS OF DISCRETIZATION IN INFORMATION ANALYSIS OF PHYSIOLOGICAL SIGNALS BY MECHATRONIC CONTROL COMPLEXES. II.

The paper considers non-trivial effects of discretization in the information analysis of physiological signals (in nonlinear formulation), which is carried out by a special purpose mechatronic control complex using standard programs for processing information having fractal properties in spatial and temporal dimension. The structure of the phase portrait of the information-measuring system intended for information analysis of physiological signals of the human body (in particular, the body of a highly qualified athlete) is rather complex. In all windows and islands of the mentioned phase portrait there is an unlimited number of “separatrix necklaces” and stochastic layers of higher order. It is they that form, as a whole, an extremely complex fractal ornament, which in this study will be described on the basis of discretization of similar signals having a fractal structure. In particular, the discretization of the scale-invariant Weierstrass-Mandelbrot fractal function is considered. A generalization of Kotelnikov's theorem for the Weierstrass-Mandelbrot function using a special Mittag-Leffler function is proposed.

УДК 536.75+681.324

БІОМЕХАНІЧНИЙ ІНЖИНІРИНГ У СПОРТІ ВИЩИХ ДОСЯГНЕНЬ: ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНТРОПІЙНИЙ ПІДХІД В АНАЛІЗІ ФІЗІОЛОГІЧНИХ СИГНАЛІВ ЗАСОБАМИ МЕХАТРОНІКИ

Шамич О.М., д-р. псих. наук, професор

Київський Національний університет будівництва і архітектури

Холодова О.С., старший викладач

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», м.Київ

Човнюк Ю.В., к. т. н., доц., Остапущенко О.П., к. т. н., доц.

Чередніченко П.П., доц.

Київський Національний університет будівництва і архітектури

Більшість фізіологічних сигналів, у т.ч. ЕЕГ, які досліджуються у спорті вищих досягнень задля моніторингу фізіологічного стану спортсменів засобами мехатроніки (мехатронних систем управління), містять детерміновану, стохастичну та хаотичну складові. У той же час традиційні спектрально-кореляційні методи аналізу ЕЕГ-сигналів дають можливість оцінити тільки детерміновані та стохастичні процеси, що дозволяє математичне забезпечення комп'ютерного блоку мехатронних систем управління (стандартне оснащення ПЕОМ). У зв'язку з цим в останнє десятиліття нейрокогнітивні дослідження у біомеханічному інжинірингу спорту вищих досягнень все частіше звертаються до математичного апарату оцінки нелінійної динаміки, зокрема, щодо використання інформаційно-ентропійного підходу для оцінки саме нейродинамічних систем у нормі та прогнозування фізичного та функціонально-психологічного станів спортсменів у передзмагальний та змагальний періоди [1-3].

Єдиного визначення поняття «ентропія» не існує, але найчастіше вона розглядається як міра невизначеності, міра хаосу у динамічній системі [4]. Останнім часом ряд різних оцінок введений для кількісної оцінки ентропії часових рядів. Ці підходи можуть бути класифіковані на дві групи: спектральні ентропії та ентропії вкладення. Спектральні ентропії ($S_p E$) оцінюють зміни амплітудної складової енергетичного спектра ЕЕГ, використовуючи амплітудні компоненти на кожній частоті спектра потужності як ймовірності у розрахунках ентропії. З іншого боку, ентропії внеску надають інформацію про те, як ЕЕГ-сигнал коливається з плином часу, порівнюючи часові ряди з самими собою через певні інтервали часової затримки [3], що дозволяє вивчати ЕЕГ-сигнал з позиції теорії нелінійної

динаміки. У нейрокогнітивних дослідженнях найпоширенішими видами ентропії внеску, що розраховуються для ЕЕГ-сигналу, є ентропія Колмогорова-Синая, апроксимована ентропія, вибіркова ентропія та багатомасштабна ентропія.

Спектральна ентропія (Spectral Entropy, $Sp E$) розраховується для спектру сигналу, отриманого з використанням дискретного перетворення Фур'є. Далі за допомогою функції Шеннона визначається набір величин, які відповідають отриманим частотним компонентам спектру потужності ЕЕГ-сигналу. Чим більшою є ентропія Шеннона, тим далі система знаходиться від впорядкованого стану, причому максимальне значення ентропії Шеннона досягається тоді, коли вірогідність появи усіх частотних компонентів рівні, тобто стани системи рівновірогідні [1]. $Sp E$ використовується для оцінки функціонального стану, виходячи з припущення про те, що у стані спокійного неспання або сну спектр потужності ЕЕГ-сигналу звужується порівняно з його розкидом від час активного неспання. Як наслідок, припускається, що структури з високим рівнем активності будуть характеризуватися високим рівнем ентропії Шеннона. На сьогодні спектральна ентропія знаходить найбільше поширення в автоматизованих моніторах ЕЕГ-сигналів для визначення різних стадій наркозу. Цей підхід може бути цілком використаний при спряженні з програмним блоком мехатронної системи управління, що входить до комплексу аналізу фізіологічних сигналів, котрі оцінюють фізичний, функціональний та психологічний стан спортсменів у задачах біомеханічного інжинірингу.

Статичну ентропію Шеннона зазвичай поширюють на динамічну систему у вигляді ентропії Колмогорова-Синая (KSE), яка визначається як швидкість втрати інформації про стан динамічної системи з плином часу та вважається однією з найважливіших характеристик детермінованого хаосу. Значення KSE задає оцінку швидкості втрати інформації, що дозволяє інтерпретувати її як міру "пам'яті" (біомеханічної) системи, або як міру швидкості «забування» початкових умов. Чим меншими є значення KSE, тим більш детермінованою/визначеною є (біомеханічна) система, і навпаки, чим більшими є значення KSE, тим більшою є стохастичність (біомеханічної) системи і, як наслідок, погане прогнозування її майбутніх станів (це особливо важливо для спорту вищих досягнень у період підготовки спортсменів до відповідальних змагань сезону/року).

Роль KSE для нелінійних (біомеханічних) систем схожа на ту роль, яку відіграє автокореляційна функція для лінійних (біомеханічних) систем. Зокрема, KSE пов'язана з показниками Ляпунова, що характеризують стійкість динамічної системи. У основі формули для розрахунку KSE лежить формула ентропії Шеннона, тобто ентропія Колмогорова-Синая задається як асимптотичний приріст невизначеності для розбиття нескінченно малого

розміру. Однак, на практиці KSE зазвичай оцінюється за допомогою показників Ляпунова, або розраховується як апроксимуюча її величина K_2 через кореляційний інтеграл [5]. Алгоритм розрахунку KSE передбачає наявність стаціонарних довгих часових рядів (35–45 секунд безартефактних фрагментів ЕЕГ-сигналу з частотою дискретизації не менше 400 Гц), тому KSE має обмежене застосування для аналізу ЕЕГ-сигналів у режимі моніторингу ЕЕГ (як і множини інших фізіологічних сигналів, які спостерігаються у спортсменів високої кваліфікації при їх поточному та періодичному/регулярному медичному обстеженні задля отримання тренерами адекватної уяви про фізіологічний, психічний, функціональний, фізичний стани).

Саме тому пропонується модифікований алгоритм розрахунку KSE, відомий як апроксимована (наближена) ентропія (Approximate Entropy – Ap En), яка може бути розрахована на коротких фрагментах ЕЕГ-сигналів (інших фізіологічних сигналів), приблизно 1000 відліків, та є стійкою до шумових сигналів. Ap En є мірою нерегулярності/передбачуваності часових рядів кінцевої довжини [6]. Однак, значення Ap En різко зменшується при збільшенні довжини фрагменту ЕЕГ (іншого фізіологічного сигналу при його біомеханічному моніторингу). Для подолання цього недоліку була розроблена вибіркова ентропія (ентропія шаблонів – Sample Entropy, Samp En), яка також являє собою KSE, але визначається на підставі ентропії кореляції, а не ентропії Шеннона [7]. Зазначені вище види ентропії кількісно визначають лише (передбачуваність) часових рядів за єдиною шкалою. Однак немає прямого зв'язку між регулярністю та складністю. Так, не повністю передбачувані (наприклад, періодичні) сигнали, що мають мінімальну ентропію, або абсолютно непередбачувані (наприклад, некорельовані випадкові) сигнали, що мають максимальну ентропію, справді складні, оскільки їх можна описати дуже компактно. Не існує єдиного визначення складності динамічної системи. Інтуїтивно, складність пов'язана зі значним структурним багатством, що включає кореляції у декількох просторово-часових масштабах. Кількісно визначити таку складність системи дозволяє багатомасштабна ентропія (Multiscale Entropy, MSE), яка розраховується на підставі Samp En та враховує кореляції, притаманні ЕЕГ-сигналам (іншим фізіологічним сигналам, за якими здійснюється біомеханічний комплексний моніторинг станів організму спортсмена) на декількох часових масштабах. MSE дозволяє диференціювати шум та значущу складність сигналу, а також здатна виявляти часові кореляції на великих відстанях, дозволяючи визначити присутність ефектів “пам'яті” у динаміці основного сигналу та складність просторово-часових систем нейрокогнітивних та інших фізіологічних процесів в організмі спортсменів високої кваліфікації [8].

Ентропійний підхід надає біомеханічному інжинірингу спорту вищих досягнень широкий спектр інформації та інструментів для вивчення біомеханічних підсистем людини, однак вимагає подальшої розробки, уточнення і вдосконалення фізіологічної (та нейродинамічної) інтерпретації отримуваних результатів при моніторингу фізичного, психологічного, функціонального станів спортсменів протягом й після завершення конкретного періоду їх підготовки до змагань та тренувань.

- [1] Кузнецов А.А. Методы анализа и обработки ЭЭГ-сигналов: новые подходы к сбору информации. – Владимир: Изд-во гос. ун-та, 2008. 140 с.
- [2] Mayorov O.Yu., Fritsche M., Glukhov A.B. et. al. New neurodiagnostics technology for brain research on the basis of multivariate nonlinear (deterministic chaos) analysis of EEG. Proceeding of the 2nd European Congress “Achievements in space medicine into health care practice and industry”. – Pabst Science Publ., Berlin, 2003. P.157-166.
- [3] Майоров О.Ю., Глухов А.Б., Фенченко В.Н., Прогнимак А.Б. Реализация метода смещения с помощью оценки размеров осей аттрактора по одномерной реализации динамической системы мозга. Труды Ин-та кибернетики. Вып. 153. 2007. С. 3-11.
- [4] Редька І.В. Ентропійний підхід до аналізу ЕЕГ-сигналів. Міжнародна конференція «Інформаційні системи та технології в медицині» (ISM-2018), м. Харків, ХНУРЕ, 28-30 листопада 2018 р. Збірник тез конференції. Харків: ХНУРЕ, 2018. С. 234-236.
- [5] Лоскутов А.Ю., Козлов А.А., Хаханов Ю.М. Энтропия и прогноз временных рядов в теории динамических систем. Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, №4. С. 98-113.
- [6] Pincus S.M., Gladstone S.M., Ehrenkranz R.A. A regularity statistic for medical data analysis. J. Clin. Monit. 1991. No. 7. P. 335-345.
- [7]. Richman J.S., Moorman J.R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. American Journal Physiol. Heart Circ Physiol. 2000. Vol. 278. P. 2039-2049.
- [8] Costa M., Costa M., Goldberger A.I., Peng C.K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series. Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 89: 068102.

BIOMECHANICAL ENGINEERING IN ELITE SPORTS: INFORMATION –ENTROPY APPROACH IN THE ANALYSIS OF PHYSIOLOGICAL SIGNALS USING MECHATRONICS

Physiological signals, as well as EEG signals, include determinant, stochastic and chaotic components. The entropy approach allows us to estimate these signals as nonlinear dynamics. It is a brief review of the main types of entropy which are widely distributed in biomechanical engineering (stages of monitoring and analysis) and in neurocognitive studies. They include Spectral entropy, Kolmogorov-Sinai Entropy, Approximate Entropy, Sample Entropy, Multiscale Entropy. The physiological interpretation of different types of entropy in biomechanical engineering in elite sports has been established. These models give one the possibility to conduct a comprehensive analysis of monitoring data on the physical, functional and psychological states of highly qualified athletes using mechatronics.

УДК 681.3: 539.3

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ СИЛ РАМНОЇ СИСТЕМИ

Балдук П.Г.,

Державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, baldook.p@odaba.edu.ua

В наслідок війни в Україні масово відбувається пошкодження та руйнування будівель та споруд, яке частіше супроводжується пожарами. В разі невеликих пошкоджень елементів їх конструкцій, виникає питання про проведення технічного обстеження споруд з метою визначення подальшої їх експлуатації та планування позачергових аварійних заходів.

Результати досліджень напружено-деформованого стану пошкоджених окремих елементів будівельних конструкцій відображені у чисельних публікаціях. Питання впливу пошкоджень в перерізі на несучу здатність залізобетонних колон знайшли своє відображення в роботах [1, 2]. Питання впливу місця ушкодження на несучу здатність елементів металевих колон досліджувалося у роботах [3, 4]. Вплив високих рівнів температури на роботу залізобетонних елементів проаналізований в [5]. Але, в усіх цих роботах не вивчався вплив ушкодження одного, або декілька елементів, на несучу здатність всієї конструкції в цілому.

Експериментально доведено, що це механічні властивості будівельних матеріалів значно залежить від температури. Особливо це притаманно маловуглецевій сталі, з якої головним чином виготовляються будівельні конструкції [6]. Як видно залежності, яка наведена на рис.1, на всьому інтервалі температур модуль пружності E для неї падає.

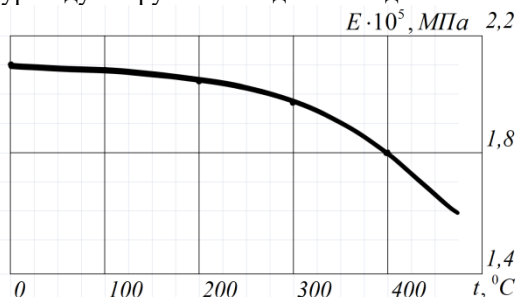


Рис.1. Графік залежності модуля пружності маловуглецевої сталі

Метою даної роботи є оцінка температурного впливу (в даному випадку тільки від зміни модуля пружності сталі) на величину критичних сил у багато прольотній рамі.

Розглядається багатопрогонова рама періодичної структури (висота стійок – 4 м., довжина прольотів – 4 м.) під дією вертикального комбінованого навантаження – розподіленої ваги ригелів та зосереджених сил, що виникають від навантаження елементів перекриття. Елементи рами мають геометричні та фізико-механічні характеристики, стали за їх довжиною. Стійки мають переріз квадратної труби розміром $140 \times 140 \times 5$ мм. Елементи рами виконані зі сталі класу C255 (з модулем пружності $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа), Розрахунки виконуються для різних рівнів температури (20, 100, 200, 300 °C) та розташування місця температурного впливу (нагрівання тільки крайньої стійки, нагрівання стійок тільки першого прольоту, нагрівання стійок тільки другого прольоту).

Для отримання залежності зміни критичного значення навантаження рами від впливу температури використовується методика визначення критичного навантаження з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності [7]. Виконується послідовно два розрахунку - деформаційний розрахунок рами і розрахунок рами на стійкість.

Усі розрахунки здійснюються з допомогою методу переміщень. Модель рами має 5 невідомих (при 4-х стойках у рамі). В обох розрахунках використовується однакова система рівнянь:

$$|r(\nu_o)| \cdot \{Z\} = -\{R\}. \quad (1)$$

В результаті першого розрахунку знаходиться напружено-деформований стан рами, що виникає від дії вертикально розташованого силового навантаження: рівномірно розподіленого навантаження $q = 0,25$ кН/м у всіх прольотах; зосереджених сил у вузлах $F_1 = F_5 = 25$ кН, $F_2 = F_3 = F_4 = 25$ кН.

Метою другого розрахунку є визначення критичних сил у задачі втрати стійкості першого роду стосовно поздовжнього вигину стійок рамної системи. На відміну від раніше розглянутої розрахункової схеми, у вузлах рами діють лише система наведених вертикальних зосереджених сил (через це всі вантажні коефіцієнти системи рівнянь (1) прирівнюються до нуля). Величини цих сил виходять у деформаційному розрахунку та прирівнюються до значень поздовжніх зусиль у стійках рами.

Визначник матриці коефіцієнтів системи (1), за умови ненульових переміщень, дорівнює нулю. Усі нелінійні функції, і як наслідок всі одиничні коефіцієнти цього рівняння, є функціями лише одного аргументу ν_o . Пошук критичних сил полягає у визначенні коріння загального рівняння стійкості

$D(v_o) = |\Phi_{i,k}(v_o)| = 0$. Найменше значення $v_{i,kp}$ визначає критичне значення будь-якої з вертикальних сил системи.

В результаті виконаних розрахунків отримано критичні значення поздовжніх зусиль у стійках. Найбільше зменшення критичної сили рами (у порівнянні з відсутністю нагріву) виникає у тому випадку, коли температура впливає на стійки у її другому прольоті. Приведені значення критичних поздовжніх зусиль, для цього випадку, надано у таблиці 1.

Таблиця 1

Приведені значення критичних поздовжніх зусиль

№	$t, ^\circ\text{C}$	$E \cdot 10^5 \text{ МПа}$	$\frac{N}{N_{\text{norm}}}, \%$
1	20	2,1	100
2	100	2,08	99
3	200	2,05	98
4	300	1,96	96

Отримані результати можуть бути використані експертними комісіями, при проведенні обстежень пошкоджених пожежами споруд та складання первинних висновків.

[1]. Клименко С.В., Антонюк Н.Р., Максютя О.В Несуча здатність пошкоджених залізобетонних двотаврових колон Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2021, no. 85, page 18-27.

[2]. [Lobodanov Maksym](#) , [Vegeera Pavlo](#) , [Blikharskyi Zinovi](#) Аналіз впливу основних видів дефектів і пошкоджень на несучу здатність залізобетонних елементів та методи їх дослідження DOI [10.30657/ropox.2019.22.05](#)

[3]. N.A. Buzalo, A.S. Alexeeva, B.A. Chernykhovsky Modeling of Damages of Steel Structures of Industrial Buildings December 2019 [Journal of Physics Conference Series](#) 1425(1):012057

[4]. Аскіназі В.Ю. Просторова стійкість елементів сталевих рамних конструкцій змінної жорсткості дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. <https://www.dissercat.com/content/prostranstvennaya-ustoichivost-elementov-stalnykh-ramnykh-konstruktsii-peremennoi-zhestkosti>

[5]. Otrosh Y., Surianinov M., Golodnov A., Starova O. Experimental and computer researches of ferroconcrete beams at high-temperature influences./ *Materials Science Forum* (968), 2019. С.355-360.

[6]. Матеріали КІП ім.Сікорського [Електронний ресурс]: - Режим доступу: http://mmi-dmm.kpi.ua/images/pdf/personnel/Zakhov/OM/L_11.pdf

[7]. P. Balduk, H. Balduk, O. Yaremenko and N. Yaremenko Calculation of a multi-span frame for stability IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1164 012008 doi:10.1088/1757-899X/1164/1/012008

INFLUENCE OF TEMPERATURE LOAD ON THE VALUE OF CRITICAL FORCES OF THE FRAME SYSTEM

The dependence of the critical value of the load acting on a flat multi-span frame is considered, taking into account the influence of the temperature level on the value of the elastic modulus of steel. The dependence is studied for a metal single-story flat frame with four identical spans. The frame elements have arbitrary stiffnesses, constant in length. The problem is solved in two stages. At the first stage, a deformation calculation of the frame is performed, the main purpose of which is to obtain the values of longitudinal forces in the racks. At the second stage, the loss of stability of the first kind is considered in relation to the longitudinal bending of the racks under the action of vertical forces. The results of the calculations are compared.