

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)

XII Міжнародна конференція
АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНЖЕНЕРНОЇ
МЕХАНІКИ

XII International Conference
ACTUAL PROBLEMS OF ENGINEERING
MECHANICS



ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ
ABSTRACTS OF REPORTS

Одеса, 20-22 травня 2026 року



УДК 621.01

Актуальні проблеми інженерної механіки / Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. М.Г. Сур'янінова. Одеса: ОДАБА, 2026. 245 с.

ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Дзюба С.В., к.т.н., доц., ректор Одеської державної академії будівництва та архітектури, **голова оргкомітету**

Крутий Ю.С., д.т.н., проф., завідувач кафедри інформаційних технологій та прикладної математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, **заступник голови**

Отрош Ю. О. д.т.н., проф., начальник кафедри пожежної профілактики у населених пунктах Національного університету цивільної захисту України, **заступник голови**

Сур'янінов М.Г., д.т.н., проф., зав. каф. будівельної механіки 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

Кюсак В. А., д.ф.-м.н., проф., професор кафедри вищої математики Одеської державної академії будівництва та архітектури

Ковров А.В., к.т.н., проф., заслужений діяч науки і техніки України, проректор 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

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

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

Суханов В.Г., д.т.н., проф., директор архітектурно-художнього інституту, Одеська державна академія будівництва та архітектури, науковий керівник НВЦ «Екострой»

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

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

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

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

Prof. Francesco Pepe, University of Sannio (Italy)

ЗМІСТ

Azizov T.N. , Maistrenko O.F. , Balakan M.S. ON THE CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE FOLDED SYSTEMS CONSTRUCTED WITHOUT FORMWORK	9
Бабула І.В. ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ	11
Балдук П.Г., Балдук Г.П. ВИКОРИСТАННЯ ОПЦІЙ «ПІДБІР ПАРАМЕТРА» ТА «ПОШУК РОЗВ'ЯЗАННЯ» EXCEL В ЗАДАЧАХ БУДІВЕЛЬНОЇ МЕХАНІКИ	14
Бало Я.В., Ковалишин Б.М. ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОТИПОЖЕЖНИХ КАРНИЗІВ НА ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗЗОВНІ ФАСАДІВ БУДІВЕЛЬ	18
Бало Я.В., Середа Д.В. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ НЕБЕЗПЕКИ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ВІД ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК	22
Бекірова М.М. ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ УТВОРЕННЯ ПЕРШОЇ ТРІЩИНИ У ЗАЛІЗОБЕТОННІЙ СТІЙЦІ	25
Bekshaev S. ON THE BUCKLING OF ROD DUE TO AXIAL TENSION	28
Чумаченко Т.В., Беспалова А.В., Книш О.І., Дашковська О.П. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИПРОБУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ШУМОЗАХИСТУ	33
Чумаченко Т.В., Вудвуд О.М., Лінгур В.М., Михайлов Є.П., Беспалова А.В., Книш О.І. СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОСТІ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТА	38
Біда С.В., Яхін С.В., Муравльов О.В., Петраш Р.В. ВИКОРИСТАННЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НАТЗСУВНИХ І ЗСУВО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕРИТОРІЯХ, СКЛАДЕНИХ ЛЕСОВИМИ ГРУНТАМИ	41
Біляєв М.А. ЗБІРНІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННІ ПЕРЕКРИТТЯ ПІД ДІЄЮ ВИБУХУ НА МАЛИХ ВІДСТАНЯХ ВІД НИХ	45
Васильєва Н.С., Васильєв О.Б., Давидов К.А. ЗАСТОСУВАННЯ ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ ПРИ ПОРІВНЯННІ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПАНІЙ	48
Вировой В.М., Довгань О.Д. ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ ДЕКОРАТИВНИХ ВИРОБІВ	49
Волков О.О., Краєвська Ж.В., Субботін О.В., Васильченко О.В. ВПЛИВ РІЗНИХ МЕТОДІВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ НА ПІДВИЩЕННЯ АНТИФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧОРНИХ ТА КОЛЬОРОВИХ СПЛАВІВ	54
Волков О.О., Субботіна В.В., Васильченко О.В., Любченко О.В. СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ І ЗМІНА ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ, ЯК РЕЗУЛЬТАТ ДОДАТКОВОГО ФРИКЦІЙНО-ДЕФОРМАЦІЙНОГО ВПЛИВУ	56

Коврова В.О., Волкова В.С. МОДАЛЬНИЙ АНАЛІЗ БАГАТО- ПОВЕРХОВОЇ БУДІВЛІ З УРАХУВАННЯМ ОДНОСТОРОННІХ ЗВ'ЯЗКІВ	59
Гарт Е.Л., Терьохін Б.І. ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ ПОБЛИЗУ ЕЛІПТИЧНОГО ОТВОРУ В ФУНКЦІОНАЛЬНО- ГРАДІЄНТНИХ ПЛАСТИНАХ З РІЗНИХ ТИПІВ МАТЕРІАЛІВ	64
Горик О.В., Ковальчук С.Б., Брикун О.М., Рябов А.М. ОЦІНКА ЗНОШУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ДРОБУ ПРИ ДРОБОСТРУМІННІ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ	67
Гузій С.Г., Курська Т.М. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄМНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ГЕОЦЕМЕНТНИХ КОМПАУНДІВ ІЗ ІМІТАТОМ БОРВМІСНИХ РІДКИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ	71
Гуртовий О.Г., Тинчук С.О. ДЕФОРМУВАННЯ ЛОКАЛЬНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ ДОРІГ ТА МОСТІВ НА ЖОРСТКІЙ ОСНОВІ	75
Жмурко Р.А. ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ АРМОВАНОГО БЕТОНУ ЗА РАХУНОК МОДИФІКАЦІЇ КОНТАКТНОЇ ЗОНИ КОМПОЗИТНОЇ АРМАТУРИ	78
Зеленський А.Г., Слободянюк С.О. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НЕТОНКНИХ ПОЛОГИХ ОРТОТРОПНИХ ОБОЛОНОК З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ЗБУРЕНЬ	81
Зятюк Ю.Ю., Кузло М.Т., Кушнір В.П. МОДЕЛЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ҐРУНТОВИХ МАСИВІВ У БАГАТОШАРОВІЙ КОНСТРУКЦІЇ	84
Карпюк І.А., Карпюк М.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЗАЛЬТОБЕТОННИХ БАЛОК	88
Кіріченко Д.О., Чистяков А.О. ВПЛИВ ПОЧАТКОВОЇ ГЕОМЕТРІЇ НА РЕЗУЛЬТАТИ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ФЕРМОВИХ КОНСТРУКЦІЙ	90
Козачок О.П., Маланчук Н.І., Мартиняк Р.М. ЛОКАЛЬНЕ ЗНОШУВАН- НЯ ПРУЖНИХ ТІЛ ЗА КУСКОВО-ОДНОРІДНОГО КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ	93
Колісник К.Д., Чухліб В.Л. АНАЛІЗ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ОСАДЖУВАННІ ТА ПРОТЯГУВАННІ ЗАГОТОВОК ДЛЯ КУВАННЯ ГАКІВ	95
Семенова С.В., Колесников А.В., Загинайло І. В., Писаренко О.М. МЕТОД АНАЛОГІЙ У ТЕОРІЇ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ: ФІБРОКОМПОЗИТИ ТА РІДКІ КРИСТАЛИ	97
Семенова С.В., Колесников А.В., Олійник Т.П., Гедулян С.І. СТОХАС- ТИЧНА КІНЕТИКА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В'ЯЗУЧИХ СИСТЕМ	101
Копил Б.Я. ОЦІНЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ ПІНОКОКСОВОГО ШАРУ РЕАКТИВНИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИВІВ ДЛЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ	105
Крутій Ю.С., Сур'янінов М.Г., Перпері А.О., Карнаухова Г.С., Бекшаєв О.А. ПРО АНАЛІТИЧНУ МОДЕЛЬ ЗГИНУ ШАРНІРНО	

ОБПЕРТОЇ ПЛАСТИНИ НА НЕОДНОРІДНІЙ ОСНОВІ Майборода Р.І. СТІЙКІСТЬ МОНОЛІТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ ЗА УМОВ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ ПОЖЕЖИ ТА ДЕФЛАГРАЦІЙНОГО ВИБУХУ	108 110
Мартинюк Н.О., Мікуліч О.А. ОПТИЧНА ДІАГНОСТИКА ДЕФОРМАЦІЙ ПІНОБЕТОНУ МЕТОДОМ СТРУКТУРНО- АДАПТИВНОЇ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ	114
Сур'янінов М.Г., Метлицький В.В. ПРОГИНИ СТАЛЕФІБРОБЕТОННИХ ТА БЕТОННИХ ОБОЛОНОК ОДНАКОВОЇ ТОВЩИНИ НА ПОЧАТКУ ТРИЩИНОУТВОРЕННЯ	117
Сур'янінов М.Г., Метлицький В.В. ЗМІНА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ БЕТОННИХ І ФІБРОБЕТОННИХ ОБОЛОНОК ПРИ ЗМІНІ ЇХ ТОВЩИНИ	120
Naumyk V.V., Pavlenko D.V., Kaganovsky O.D., Pedash O.O. FATIGUE ENDURANCE OF PARTS OBTAINED BY SELECTIVE LASER FUSION OF NICKEL ALLOY POWDERS	123
Отрош Ю.А., Ломакін В.В., Сіпко О.В. ПІДХОДИ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ	125
Отрош Ю.А., Рашкевич Н.В., Мельник І.В. КОМБІНОВАНИЙ ЗАХИСТ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ	130
Пальчиков Р.В., Ніжник В.В., Тригуб В.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖИ НА АВТОТРАНСФОРМАТОРАХ, ЩО ВСТАНОВЛЮЮТЬСЯ В ЗАХИСНИХ СПОРУДАХ	136
Шульгін В.В., Попович Н.М., Петраш О.В., Бондар Л.В. ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ГАЗОВИДІЛЕННЯ В РОЗЧИНОВІЙ СУМІШІ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНУ	139
Постернак О.О., Сінгаївський П.М., Купченко Ю.В., Уразманова Н.Ф. ЕФЕКТИВНИЙ СПОСІБ ПОПЕРЕДНЬОГО НАПРУЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ АРКОВИХ СИСТЕМ З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ МЕТАЛОЄМНОСТІ ПОКРИТТІВ БУДІВЕЛЬ	144
Рашкевич Н.В., Рашкевич О.С. ОЦІНЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОЇ МІЦНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПІСЛЯ ТЕПЛОГО ВПЛИВУ МЕТОДОМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ	147
Протасенко Т.О., Реброва О.М., Ребров О.Ю., Васильченко О.В., Щегольова М.Г. ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГКОПЛАВКИХ ПРИПОІВ	150
Рябчиков М.Л., Александров О.В., Александров М.О., Сичов Ю.І. НЕЛІНІЙНІ ЕФЕКТИ ПРИ ЗАМЕРЗАННІ ВОДИ В ПОРАХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ	153
Сідней С.О. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ В ЗАЛІЗОБЕТОННІЙ СТІНІ ПРИ ОДНОСТОРОННЬОМУ ВПЛИВІ ПОЖЕЖИ	157

Сідней С.О. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ УКРИТТЯ ПРИ ДІЇ ІМПУЛЬСНОГО НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ	161
Сур'янінов В.М. ВИДИ ФІБРОБЕТОНУ У БУДІВНИЦТВІ	165
Сур'янінов М.Г., Кіріченко Д.О. ДИСПЕРСНЕ АРМУВАННЯ БЕТОНУ БАЗАЛЬТОВОЮ ФІБРОЮ	168
Суханевич М.В., Чахоян В.А. ТРАДИЦІЙНИЙ БЕТОН ТА БЕТОН ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ 3D-ДРУКУ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ	171
Твардовський І.О., Чучмай С.М., Калініна Т.О. ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ СТАЛЕВОГО КАРКАСУ ДЛЯ СВЕТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ ТЫЛІСЬКОГО ТОРГОВОГО ЦЕНТРУ ПО ВУЛИЦІ А.ТВАЛЧРЕЛИДЗЕ, 2	175
Трач В.М., Хоружий М.М., Подворний А.В. ВПЛИВ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНОГО ПОКРИТТЯ НА СТІЙКІСТЬ НЕТОНКИХ АНІЗОТРОПНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ПРИ БОКОВОМУ ТИСКУ	180
Трач В.М., Подворний А.В., Літніцький В.І. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІДЗЕМНИХ ТУНЕЛЬНИХ СПОРУД ВІД ДІЇ БІЧНОГО ТИСКУ	184
Ходанен Т.В., Лобода К.В. ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОДІВ МІЖ ДВОМА П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМИ МАТЕРІАЛАМИ	186
Цапко Ю.В., Цапко О.Ю., Бондаренко О.П., Бердник О.Ю. ВСТАНОВЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИФУЗІЇ ВОДИ ПРИ ЗАХИСТІ ДЕРЕВИНИ ГІДРОФОБІЗУВАЛЬНОЮ СУМІШШЮ	188
Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П., Остапушенко О.П., Бондар С.А. ВИКОРИСТАННЯ У МАТЕМАТИЧНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ МЕХАТРОННИХ МОДУЛІВ РУХУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ХАРТЛІ ПРИ ВІБРОАКУСТИЧНОМУ АНАЛІЗІ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ГУСЕНИЧНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН	192
Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П., Остапушенко О.П., Бондар С.А. МЕТОДИ ДИНАМІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КЕРОВАНОГО РОЗГАЛЬМУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ ПІДЙОМУ КРАНІВ З МЕХАТРОННИМИ СИСТЕМАМИ УПРАВЛІННЯ ПРИ СКИДАННІ ВАНТАЖІВ	194
Chystiakov A., Kirichenko D., Kovacicova J. EVALUATING THE BIODEGRADATION OF WOOD-POLYMER COMPOSITES THROUGH LONGITUDINAL PHYSICO-MECHANICAL ANALYSIS	196
Чумак К.А. КОНТАКТ ПРУЖНОГО ТІЛА З ЖОРСТКОЮ МІКРОТЕКСТУРОВАНОЮ ОСНОВОЮ ЗА ВИСОКОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ІНТЕРФЕЙСУ	199
Чучмай С.М., Твардовський І.О., Чучмай О.М. ПРОЕКТУВАННЯ АРОК МІНІМАЛЬНОЇ ВАГИ ПО МЕТОДУ ГРАНИЧНОЇ РІВНОВАГИ	204
Чучмай С.М., Чучмай О.М. РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ	

ЕЛЕМЕНТІВ ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ ПРИ ВИГІНИ З КРУЧЕННЯМ	207
Shapoval O.O., Kulynych V.D., Kulynych S.A., Savchenko Iu. THEORETICAL JUSTIFICATION OF METALLIC SURFACE HARDENING BY PLASTIC SHOT BLASTING	209
Шаповал О.О., Вакуленко Р.А., Кузев І.О., Кухар В.В. МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТРУБИ ТА ТРУБНОЇ РЕШІТКИ	217
Щолоков Е.Е. УТОЧНЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ДІТЕЙ ДОШКІЛЬНОГО ВІКУ ПІД ЧАС ЕВАКУАЦІЇ ПРИ ПОЖЕЖІ	221
Сур'янінов М.Г., Неутов С.П., Корнеєва І.Б. ЛАБОРАТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ОБОЛОНОК ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОНУ ТА СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ	225
Крадінова Т.А., Гуда О.В. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО АНАЛІЗУ В ШТУЧНОМУ ІНТЕЛЕКТІ	229
Зятюк Ю.Ю., Поліщук О.М., Фурсович М.О., Супрунюк В.В., Романюк В.В. ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ФІБРОБЕТОНУ ДЛЯ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ В УМОВАХ АГРЕСИВНОГО СЕРЕДОВИЩА	232
Trofimova L.E. TOPOLOGICAL GENERALIZATION OF THE LAWS OF STRUCTURE FORMATION PROCESSES IN DISPERSED SYSTEMS AND MATERIALS	236
Андрійчук О.В., Громов Д.Ю. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ ТА ДЕФОРМІВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНУ ТА СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ	241

UDC 624.012.45

ON THE CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE FOLDED SYSTEMS CONSTRUCTED WITHOUT FORMWORK

T.N. Azizov, Doctor of Engineering, Professor

Sumy National Agrarian University, Sumy

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa

O.F. Maistrenko, Ph.D. in Engineering, Associate Professor

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa

M.S. Balakan, Student

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa

Modern construction demands solutions that combine architectural expressiveness with high economic efficiency. Thin-walled folded vaults are an example of such systems. Special attention should be paid to the technology of formwork-free construction, where precast reinforced concrete elements serve as stay-in-place formwork [2].

The primary scientific challenge in designing such systems is the necessity of discrete modeling. Since the structure consists of heterogeneous sections (precast concrete and cast-in-place joints), the following problem arises: can such a system be considered homogeneous, or is it necessary to perform detailed modeling of each joint? The calculation theory for such shells is based on classical fundamental works [3, 4].

To address this problem, a series of numerical models was developed using the LIRA-SAPR software package. The object of study was an inclined folded arch with the following parameters: span L – from 6 to 18 m; rise f – with a ratio of $L/f = 2\div 6$;

elastic modulus of the joint concrete (E_{sh}) varied within the range of $0.5 \cdot E$ to $1.5 \cdot E$.

The calculation results demonstrated that internal forces – bending moments (M), axial forces (N), and shear forces (Q) – exhibit low sensitivity to changes in the elastic modulus of the joints. Even with a significant reduction in concrete stiffness within the joint zone ($E_{sh}=0.5 \cdot E$), the deviation of force values from the homogeneous model did not exceed 2-4%.

This is explained by the membrane behavior of the vault. In shallow arches, the bulk of the external load is transformed into axial compression (thrust). Since compressive forces are transmitted across the entire cross-sectional area, a local change in the deformability of the joint does not lead to a global redistribution of forces.

The verification of joint strength was conducted according to Eurocode 2 [1]. The critical component of the precast-monolithic system is the contact surface

(interface). The interface shear calculation was performed using the following formula:

$$V_{Rdi} = c \cdot f_{cd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (1)$$

It was established that for the considered range of geometric parameters, the ratio of design shear resistance to the acting design shear force (V_{Rdi}/V_{Edi}) ranges from 60 to 74. Such a high safety margin is due to the fact that in arch systems, the transverse forces (Q) that cause interface shear are minimal compared to the large contact area between the concrete surfaces.

A comparison between the detailed model (with explicit representation of the joints) and the simplified beam (frame) model confirmed the validity of the latter. Applying Saint-Venant's principle allows for the assertion that local stress disturbances in the joint zones do not affect the overall statics of the system.

This enables the engineer to:

- avoid complex spatial modeling of contact zones;
- utilize standard software modules for the calculation of homogeneous arches;
- significantly reduce the time required for preparing the structural calculation model.

Conclusions. The study results demonstrate that the stress-strain state of thin-walled folded vaults is primarily governed by their geometric configuration rather than the local material heterogeneity of the joints. For the practical design of precast-monolithic vaults constructed without formwork, a simplified homogeneous arch model is found to be entirely sufficient. It has been established that the contact joints possess a significant excess margin of shear strength according to the standards [1], allowing them to be treated as rigid interfaces without the risk of failure along the interface. The identified strength potential opens perspectives for further structural optimization, specifically by reducing the thickness of the folded plates or lowering the concrete class for the monolithic sections.

[1]. EN 1992-1-1:2004. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization.

[2]. Azizov, T. N. (2010). Sposib vyhotovlennia prostorovoi zbirno-monolitnoi konstruktsii [Method of manufacturing a spatial precast-monolithic structure]. Ukrainian Patent for Utility Model No. 54246. Bulletin No. 20.

[3]. Timoshenko, S. P., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). Theory of Plates and Shells (2nd ed.). McGraw-Hill.

[4]. Bazhenov, V. A., & Pohorelov, V. M. (2010). Teoriia tonkykh obolonok i plastyn [Theory of thin shells and plates]. Kyiv National University of Construction and Architecture.

ДО РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СКЛАДЧАСТИХ СИСТЕМ БЕЗ ВИКОРИСТАННЯ ОПАЛУБКИ

Наведені особливості розрахунку збірно-монолітних тонкостінних складчастих склепінь, що зводяться за технологією безопалубного формування. На основі чисельного моделювання у ПК Ліра-САПП проведено порівняльний аналіз дискретних та гомогенних моделей арок у широкому діапазоні геометричних параметрів. Встановлено, що мембранний характер роботи системи забезпечує низьку чутливість внутрішніх зусиль до локальної неоднорідності матеріалу швів. Перевірка за Єврокодом-2 виявила значний запас несучої здатності контактних поверхонь на зсув, що підтверджує можливість використання спрощених стрижневих моделей для практичного проектування.

УДК 539.3

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Бабула І. В.,

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

Сучасне виробництво переходить від використання гомогенних матеріалів до складних структурно-неоднорідних систем: композитів, пористих структур, металокераміки та адитивних матеріалів. Головною особливістю таких матеріалів є те, що їхні макроскопічні властивості, такі як міцність та зносостійкість критично залежать від мезо- та мікроструктури.

Класичне чисельне моделювання, зокрема, на основі моделей, що використовуються метод скінченних елементів, зазвичай усереднює показники в межах досліджуваного елемента. Це призводить до втрати локальних ефектів та неможливості враховувати вплив концентраторів напружень та зародження мікротріщин, які є критичними при створенні систем моніторингу типу «цифровий двійник». Тому розробка цифрових двійників для таких об'єктів потребує відходу від класичних статичних моделей на користь багаторівневих інтелектуальних динамічних систем [1].

У роботі використано концепцію багаторівневого моделювання [2], згідно з якою цифровий двійник повинен одночасно функціонувати на кількох просторово-часових масштабах: макrorівні (рівень конструктивного елемента) та мезо-/мікрорівні (кристалічні зерна, армуючі волокна, пори).

На відміну від статичної математичної моделі, двійник безперервно адаптується та оновлюється на основі поточкових даних від інтегрованих сенсорів (тензометрія, акустична емісія) або періодичного неруйнівного контролю (високоточна комп'ютерна мікро-томографія, μ -СТ). Побудова

геометрії цифрових двійників дозволяє створити точну цифрову репліку конкретного фізичного зразка із врахуванням його індивідуальних дефектів, а не усередненої теоретичної моделі. Оскільки геометрична неоднорідність завжди має елемент випадковості, архітектура цифрового двійника базується на стохастичних та ймовірнісних моделях, а не лише на жорстких детермінованих алгоритмах.

Головним бар'єром на шляху реалізації мікроструктурного моделювання є колосальна обчислювальна складність: прямий розрахунок поведінки елемента з урахуванням кожного волокна або пори класичними числовими методами, такі як МСЕ потребує великих ресурсів. Для забезпечення роботи цифрових двійників у реальному часі пропонується використати три ключові напрямки штучного інтелекту:

1. Створення сурогатних моделей – швидких прогностичних моделей-апроксиматорів, які навчаються на масиві попередньо розрахованих даних МСЕ і здатні прогнозувати напружено-деформований стан за малі поміжки часу.

2. Нейронні мережі - архітектури глибокого навчання, у функцію втрат яких безпосередньо інтегровані фундаментальні фізичні закони [3]. Загальний вигляд цільової функції при розв'язанні задач механіки суцільного середовища має вигляд:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{data} + \mathcal{L}_{PDE} + \mathcal{L}_{BC}$$

де \mathcal{L}_{data} – похибка натурних вимірювань датчиків, \mathcal{L}_{BC} – нев'язка граничних умов, а \mathcal{L}_{PDE} – нев'язка диференціальних рівнянь руху [3]:

$$\mathcal{L}_{PDE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\sigma_{ij,j}(x_i) + f_i(x_i)\|^2$$

Це дозволяє ефективно об'єднувати зашумлені або неповні дані з датчиків із теоретичними моделями механіки деформівного твердого тіла.

3. Автоматична сегментація мікроструктури. Використання комп'ютерного зору для згорткових нейромереж архітектури U-Net [4] дозволить проводити автоматичне розпізнавання окремих волокон та пор на знімках томографії та їх автоматичної трансформації в об'ємну розрахункову сітку. Додатково слід застосовувати генеративно-змагальні мережі (GANs) для генерації синтетичних варіантів мікроструктур під час віртуальних стрес-тестів.

Для стиснення об'ємних масивів даних мікроструктури до параметрів реального часу попується алгоритми зниження розмірності моделей [4].

Висновки. Розробка цифрових двійників структурно-неоднорідних матеріалів вимагає синергії методів обчислювальної механіки, комп'ютерного зору та фізично-орієнтованого машинного навчання. Пропонований підхід перетворює цифрові двійники з пасивного архіву даних

на динамічну прогностичну систему, дозволяючи перейти від консервативних коефіцієнтів запасу міцності до експлуатації відповідальних конструкцій за їхнім фактичним станом.

1. Virtual, digital and hybrid twins: a new paradigm in data-based engineering and engineered data / F. Chinesta et al. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 27, no. 1. P. 105-134.

2. Geers M. G., Kouznetsova V. G., Brekelmans W. A. Multi-scale computational homogenization: Trends and challenges. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2010. Vol. 234, no. 7. P. 2175-2182.

3. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*. 2019. Vol. 378. P. 686-707.

4. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. Cham : Springer, 2015. P. 234–241.

5. Kapadia M., Shah S. Digital Twin for Wind Turbine Blades: A Review on Structural Health Monitoring. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 156. Art. 111984.

PECULIARITIES OF DIGITAL TWIN DEVELOPMENT FOR STRUCTURALLY INHOMOGENEOUS MATERIALS

The paper considers a multiscale modeling framework for Digital Twins (DT) of structurally inhomogeneous materials (composites, porous structures, cermets). To bypass the heavy computational limitations of classical Finite Element Method (FEM) analysis at the micro-level, an integration of Physics-Informed Neural Networks (PINNs), Reduced Order Modeling (ROM), and computer vision (U-Net) is proposed. The practical case of a carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) wind turbine blade demonstrates a transition from conservative design margins to structural health monitoring and remaining useful life (RUL) prediction based on the real-world condition of the material.

УДК 624.04:004.942

ВИКОРИСТАННЯ ОПЦІЙ «ПІДБІР ПАРАМЕТРА» ТА «ПОШУК РОЗВ'ЯЗАННЯ» ЕХСЕЛ В ЗАДАЧАХ БУДІВЕЛЬНОЇ МЕХАНІКИ

Балдук П.Г., к.т.н., доц.

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса,

Балдук Г.П., к.т.н.

ТОВ «АЛБАТЕК ЮА», м. Одеса, gp.balduck@odaba.edu.ua

Актуальність використання опцій «Підбір параметра» та «Пошук розв'язання» табличного процесора Microsoft Excel в інженерних задачах зумовлена необхідністю автоматизації складних обчислень, які важко або неможливо виконати традиційними методами. Сучасний Excel - це не просто програма для роботи з числами, а повноцінне середовище для розробки аналітичних рішень та оптимізації процесів.

Оптимізація складних систем: надбудова «Пошук розв'язання» (Solver) дозволяє працювати з багатьма змінними одночасно [1-4]. Вона є актуальною для задач багатоцільової оптимізації, де необхідно знайти екстремальні значення (мінімум або максимум) цільової функції, враховуючи при цьому технічні чи економічні обмеження. Вона незамінна для знаходження розв'язків систем лінійних та нелінійних алгебраїчних рівнянь, що є типовим завданням при проектуванні конструкцій або моделюванні фізичних процесів.

Розглянемо методику використання цієї опції на прикладі рішення задачі будівельної механіки – розрахунку плоскої стержневої системи на міцність та деформативність.

Розглянемо раму з [5], для котрої прийнято (рис.1): $l=6$ м., $H=5$ м.; ширина перетинів ригеля і стояка однакова $b_r=b_c=0,2$ м., висота перетину стояка $h_c=0,4$ м.; висота перетину ригеля (при співвідношенні $I_r=2I_c$) $h_r = h_c \sqrt[3]{2}$. Матеріал рами - бетон класу B25 з модулем пружності $E=3 \cdot 10^7$ кН/м², розрахунковим опором стиску $Rb=14500$ кН/м², розрахунковим опором розтягу $Rbt=1050$ кН/м². На раму діє розподілене навантаження $q=200$ кН/м та сила $F=ql/6$.

Розрахунок статично невизначеної рами здійснюємо методом переміщень. Побудуємо основну систему, одиничну та вантажну епюри згинальних моментів. Складемо розв'язувальне рівняння (1). Усі розрахунки виконуємо у вигляді формул в табличному процесорі Microsoft Excel.

$$r_{11}Z_1 + R_{1F} = 0 \quad (1)$$

Після знаходження невідомого Z_1 , отримуємо епюри внутрішніх зусиль (епюра згинальних моментів показана на рис.2).

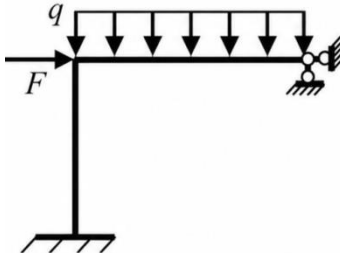


Рис.1 Розрахункова схема рами

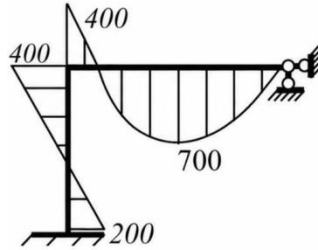


Рис.2 Епюра M , кНм

Максимальні згинальні моменти, які виникають в перетинах ригеля $M_r^{max} = 700 \text{ кНм}$ і стояка $M_c^{max} = 400 \text{ кНм}$ повинні бути меншими відповідних моментів руйнування [6]:

$$M_r = R_{bt}W_r = 8,89 \text{ кНм} \quad (2)$$

$$M_c = R_{bt}W_c = 5,6 \text{ кНм} \quad (3)$$

Умова міцності на стиск виконується, а умова міцності на згин не виконується.

Для більшості залізобетонних балок та перекриттів граничний конструктивний прогин становить [6]:

$$[f_{ult}] = \frac{l}{200} = 0,03 \text{ м.} \quad (4)$$

Для перевірки головної умови жорсткості споруди знайдемо вертикальне переміщення f в середині ригеля. Для цього побудуємо одиничну епюру згинальних моментів для основної системи методом сил (рис.3) та перемножимо її на отриману раніше епюру згинальних моментів:

$$f = \sum \int \frac{M \cdot \bar{M}_1^*}{EI} ds = 0,031 \text{ м.} \quad (5)$$

Перевірка за допустимим прогином не виконується.

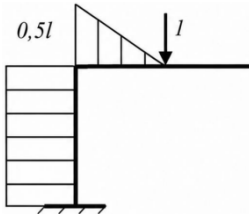


Рис.3 Епюра \bar{M}_1^* в основній системі методу сил

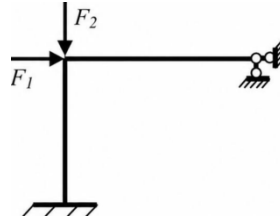


Рис.4 Схема рами для розрахунку на стійкість

Скористуємось надбудовою «Пошук розв’язання» для визначення величини розподіленого навантаження, при якому будуть задовольнятися усі умови міцності та деформативності. Для цього розв’яжемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} R_{bt}W_c - M_c^{max} \geq 0 \\ R_{bt}W_r - M_r^{max} \geq 0 \\ l/200 - f \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Отримуємо рішення: при $q=2,54 \text{ кН/м}$ максимальні згинальні моменти в перетинах ригеля $M_r^{max} = 8,89 \text{ кНм}$ і стояка $M_c^{max} = 5,08 \text{ кНм}$, $f = 0,0004 \text{ м}$. Рішення системи рівнянь (6) можливо отримати підбираючи якісь інші параметри системи.

Розв’язання нелінійних рівнянь: «Підбір параметра» (Goal Seek) є класичним методом для пошуку коренів рівнянь типу $F(x)=A$, де змінну x неможливо виразити в явному вигляді. Цей засіб працює за принципом ітерацій, поступово змінюючи значення вхідної клітинки доти, доки формула, що залежить від неї, не поверне потрібний результат.

Переваги цього інструменту покажемо на прикладі розрахунку вказаної плоскої стержневої системи на стійкість [5]. Для отримання розрахункової схеми замінимо вплив розподіленого навантаження зосередженими силами, при співвідношенні $F_2/F_1 = 3$ (рис.4).

В основній системі методу переміщень будуюмо епюру моментів від одиничного повороту введеної в'язі. Епюра будуються з допомогою таблиць з урахуванням поздовжнього вигину від дії сил F_1 та F_2 . За рахунок цього, рівняння (1) перетворюється

$$r_{11}(v)Z_1 = 0 \quad (7)$$

Значення критичних сил досягаються, якщо $r_{11}(v)$ дорівнює нулю. Після визначення $r_{11}(v)$, з урахуванням співвідношення I_r/I_c , рівняння стійкості для заданої плоскої рами [5] має вигляд:

$$0,8\varphi_2(v_2) + \varphi_1(v_1) = 0. \quad (8)$$

Після приведення функцій $\varphi(v)$ до одного аргументу, отримуємо нелінійне рівняння:

$$0,8\varphi_2(v_2) + \varphi_1(0,49v_2) = 0, \quad (9)$$

де

$$\varphi_1(v) = \frac{v^2 \operatorname{tg} v}{3(\operatorname{tg} v - v)}; \quad \varphi_2(v) = \frac{v(\operatorname{tg} v - v)}{8 \operatorname{tg} v (\operatorname{tg} \frac{v}{2} - \frac{v}{2})}.$$

Так як, усі розрахунки були зроблені у вигляді формул в табличному процесорі Excel, то для розв'язання нелінійного рівняння використовуємо опцію «Підбір параметра». Визначаємо цільову функцію як рівняння стійкості (9), та оптимізуємо її шляхом підбору значення v_2 . Отримуємо $v_2 = 5,094$. Визначаємо критичні параметри сил за формулою

$$F_{2,cr} = \frac{v_2^2 EI_c}{h^2} = 1,038 EI_c; F_{1,cr} = F_{2,cr} / 3 = 0,346 EI_c.$$

Отриманий результат повністю співпадає з результатом отриманим у [5] ручним розв'язком (за допомогою підбору з використанням таблиць спеціальних функцій) та програмою розрахунку рами, написаною мовою APDL ANSYS.

Обидва інструмента дозволяють проводити аналіз чутливості, що дає інженеру можливість миттєво побачити, як зміна вхідних параметрів вплине на кінцевий результат проекту. Освоєння цих інструментів перетворює табличний процесор Microsoft Excel у повноцінну платформу для аналітики, моделювання та прийняття рішень, що виходить далеко за межі простих обчислень. Цей підхід передбачає створення інтерактивних керованих розрахунків, які за своїм функціоналом здатні замінювати спеціалізовані комп'ютерні програми.

[1]. Дячук С. Ф. Excel 2013–2016 : навчальний посібник. Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 308 с..

[2]. Пістунов І. М. Smart Excel. Керовані розрахунки : навчальний посібник. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2026. 265 с..

[3]. Automating Goal Seek with RC Design Functions. *Newton Excel Bach, not (just) an Excel Blog*. URL: <https://newtonexcelbach.com/>.

[4]. Solving Non-Linear Equations in Excel with Goal Seek. *EngineerExcel*. URL: <https://www.engineerexcel.com/>.

[5]. Сорока М. М. ANSYS у задачах стійкості стрижневих систем : навчальний посібник. Одеса : Вид-во ОДАБА, 2017. 141 с..

[6]. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с..

USE OF EXCEL'S 'GOAL SEEK' AND 'SOLVER' OPTIONS IN ENGINEERING PROBLEMS

The methodology of using Excel's Goal Seek and Solver options is examined through the example of a structural mechanics problem – the calculation of a statically indeterminate plane rod system. The use of these tools allows for the selection of parameters that simultaneously satisfy the conditions of strength, deformability, and stability. Both instruments enable sensitivity analysis, which provides engineers with the ability to instantly see how changes in input parameters will affect the final result of the project.

УДК 614.841.45

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОТИПОЖЕЖНИХ КАРНИЗІВ НА ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗЗОВНІ ФАСАДІВ БУДІВЕЛЬ

Бало Я.В., д.т.н., ст. дослідник

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України, м. Київ

Ковалишин Б.М., аспірант

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України, м. Київ

Однією з найбільш актуальних проблем забезпечення пожежної безпеки сучасних будівель є запобігання вертикальному поширенню пожежі фасадами на вище розташовані поверхи. Особливої актуальності дана проблема набуває для висотних будівель, у яких поширення полум'я через фасадні конструкції може призводити до стрімкого розвитку пожежі, руйнування світлопрозорих конструкцій та утворення загрози життю людей. Значний вплив на процеси поширення зовнішньої пожежі мають аеродинамічні характеристики фасаду, геометрія протипожежних перешкод та взаємодія висхідного теплового потоку з конструктивними елементами будівлі.


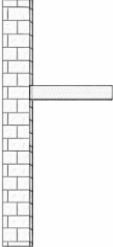
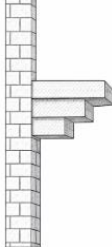
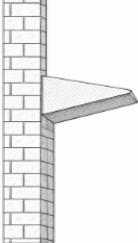
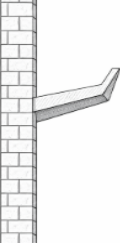
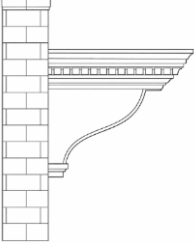
Одним із ефективних засобів пасивного захисту фасадів будівель є застосування протипожежних карнизів, які дозволяють змінювати траєкторію

руху полум'я та обмежувати тепловий вплив на вище розташовані поверхи, що представлено в роботах [1–3]. Разом із цим, ефективність таких конструкцій значною мірою залежить від їх геометричної форми, ширини виступу та здатності запобігати явищу повторного приєднання полум'я до фасаду. Існуючі нормативні документи не містять достатньо обґрунтованих критеріїв щодо вибору оптимальних параметрів протипожежних карнизів, що зумовлює необхідність проведення відповідних досліджень.

Таким чином, авторами проведено серію експериментальних досліджень із використанням створеної газо-гідродинамічної моделі поширення пожежі ззовні фасаду будівлі. У ході досліджень оцінювалися: максимальне значення температури на поверхні фасаду; площа критичного прогріву фасаду; висота зони критичного прогріву; середня швидкість висхідного потоку; значення тиску в зоні фасаду; наявність ефекту повторного приєднання полум'я.

Дослідження проводилися для наступних типів протипожежних карнизів, візуалізацію яких наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Досліджувані типи протипожежних карнизів

Фасад без карниза	Протипожежний карниз з прямою формою	Протипожежний карниз з формою багатогранника
		
Протипожежний карниз з формою гострої трапеції	Протипожежний карниз з формою «вінглету»	Протипожежний карниз з заокругленою формою виступу
		

Ширина виступу карнизів змінювалася в межах від 0,3 до 1,5 м. Розрахунки виконувалися як за умов вітрового навантаження 5 м/с, так і без впливу вітру.

Дослідження показали, що найбільш ефективним за критерієм динамічного зменшення температури в зоні фасаду при збільшенні ширини виступу є протипожежний карниз із багатогранною формою. Наявність багатограних виступів із прямокутним профілем дозволяє створити зону найменшої швидкості висхідного потоку – в межах 1,5–1,7 м/с, а також знизити значення тиску в зоні фасаду до 4–6 Па. Це сприяє формуванню траєкторії полум'я, за якої утворення точки повторного приєднання полум'я до фасаду стає малоімовірним.

Встановлено, що протипожежний карниз у формі «вінглету» забезпечує найбільшу відносну ефективність за критерієм максимальної площі критичного прогріву фасаду. Для даного типу карнизу площа критичного прогріву не перевищувала 12 % від площі захищаного фрагмента фасаду. Одночасно спостерігалось формування стабільного аеродинамічного потоку з тиском у зоні фасаду в межах 14,5–15,5 Па та швидкістю висхідного потоку 3–5 м/с. Такі характеристики забезпечують найбільш ефективне відведення полум'я від поверхні фасаду та зменшення теплового впливу на вище розташовані поверхні. На рисунку 1 наведено зведені дані відносної ефективності досліджуваних типів протипожежних карнизів.

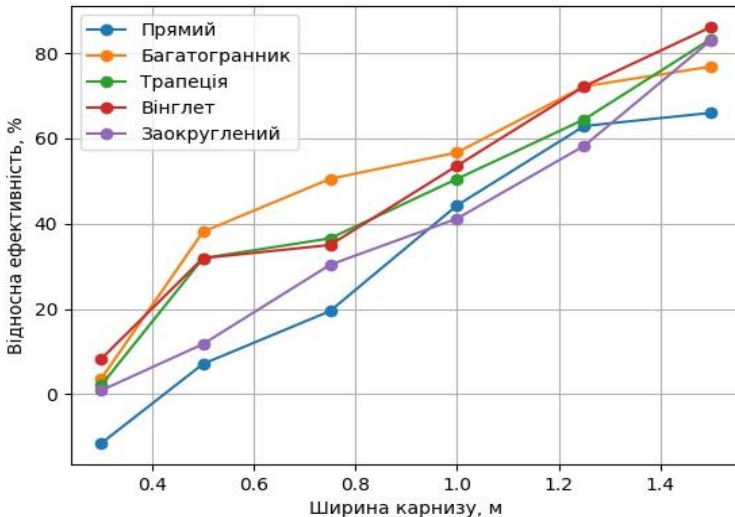


Рис. 1. Дані відносної ефективності досліджуваних типів протипожежних карнизів

За результатами дослідження встановлено, що найбільш ефективним типом фасадної протипожежної перешкоди є протипожежний карниз у формі «вінглету», який забезпечує найкращі показники за критеріями температурного режиму та площі критичного прогріву фасаду. Разом із цим найбільшу стабільність процесу відведення полум'я від поверхні фасаду забезпечує багатогранна форма карнизу, що обумовлено формуванням сприятливих аеродинамічних характеристик потоку. Проведені дослідження підтвердили суттєвий вплив геометричної форми та ширини виступу протипожежного карнизу на процеси поширення пожежі ззовні фасаду будівлі. Отримані результати дозволяють удосконалити підходи до проектування фасадних протипожежних перешкод та підвищити рівень пожежної безпеки сучасних будівель.

[1]. Kovalyshyn B., Ballo Ya., Nizhnyk V., Stylyk I., Kahitin O. (2024). Перспективні напрями підвищення ефективності обмеження поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях. [Prospective directions for improving the efficiency of limiting fire spread along external enclosing structures]. Пожежна безпека. Т. 44. С. 20–29 [in Ukrainian].

[2]. Ballo Ya. V., Yakovchuk R. S., Nizhnyk V. V. [et al.]. (2020). Дослідження конструктивних параметрів протипожежних карнизів для запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будинків. [Study of the structural parameters of fire-protection cornices for preventing fire spread through façade structures of high-rise buildings]. Пожежна безпека. № 37. С. 16–23 [in Ukrainian].

[3]. Himoto K., Tsuchihashi T., Tanaka Y., Tanaka T. (2009). Modeling the trajectory of window flames with regard to flow attachment to the adjacent wall. Fire Safety Journal. Vol. 44, No. 2. P. 250–258 [in English].

INFLUENCE OF THE STRUCTURAL PARAMETERS OF FIRE-PROTECTION CORNICES ON LIMITING FIRE SPREAD ALONG BUILDING FAÇADES

The influence of the geometric shape and projection width of fire-protection cornices on limiting fire spread along building façades is investigated. The study considers the temperature regime, critical heating area, upward flow velocity, pressure near the façade, and the possibility of flame reattachment. It was found that the winglet-shaped cornice reduces the critical heating area, while the polygonal shape provides more stable flame deflection away from the façade.

УДК 614.841.45

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ НЕБЕЗПЕКИ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ВІД ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

Бало Я.В., д.т.н., ст. дослідник

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України, м. Київ

Середа Д.В., аспірант

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України, м. Київ

Стрімкий розвиток вітрової енергетики в Україні та світі супроводжується зростанням вимог до забезпечення пожежної безпеки вітрових електроустановок (ВЕУ). Особливу небезпеку становлять пожежі у гондолі турбіни, які характеризуються значним тепловим навантаженням, складністю ліквідації та можливістю поширення горіння на суміжні об'єкти. У більшості випадків існуючі нормативні підходи до визначення безпечних протипожежних відстаней не враховують специфіку сценарію «руйнування-пожежа», що є найбільш небезпечним для сучасних ВЕУ.

У роботах [1-3] проведено комплексне дослідження процесів розвитку пожежі для різних типів вітрових електроустановок із використанням комп'ютерного моделювання. Основною метою дослідження було визначення закономірностей поширення теплового впливу від пожеж ВЕУ та удосконалення методу оцінювання небезпеки поширення пожежі з урахуванням висотного фактору та кількості пожежного навантаження у гондолі турбіни.

Моделювання проводилося для дванадцяти груп вітрових електроустановок потужністю від 0,03 МВт до 9,5 МВт. Під час розрахунків враховувалися: висота башти ВЕУ; кількість оливи у механічній частині ротора, температура горіння; швидкість вітру, поширення теплових потоків у просторі, утворення зон критичних температур. Тривалість кожного етапу моделювання становила 1200 с, що дозволило оцінити динаміку розвитку пожежі та встановити стабілізацію температурного режиму. За результатами проведених розрахунків отримано картограми температурних полів, візуалізацію поширення пожежі та визначено межі зон теплового впливу вище 250 °С.

Для групи ВЕУ потужністю від 0,03 до 0,2 МВт із висотою опори 18–38 м та кількістю оливи від 12 до 80 л встановлено, що середній температурний режим пожежі перебуває в межах 580–650 °С. При цьому розвиток пожежі мав прогнозований характер, а збільшення часу моделювання не впливало

суттєво на результати розрахунків. Встановлено, що навіть для малопотужних ВЕУ відбувається формування небезпечної зони теплового впливу, яка перевищує розрахунковий радіус розливу пального.

Для групи ВЕУ потужністю від 0,5 до 2,0 МВт із висотою башти 40–78 м та кількістю оливи 200–720 л середній температурний режим пожежі становив 620–690 °С. Отримані результати свідчать про збільшення інтенсивності теплового випромінювання та розширення зони небезпечного теплового впливу внаслідок збільшення кількості пожежного навантаження та висоти розташування осередку горіння. За результатами моделювання встановлено, що вплив вітрового навантаження сприяє суттєвому зміщенню зони теплового впливу у напрямку суміжно розташованих об'єктів.

Для групи ВЕУ потужністю від 3,0 до 7,2 МВт із висотою башти 80–169 м та кількістю оливи від 1200 до 2720 л середня температура пожежі становила 680–740 °С. Отримані результати показали суттєве збільшення радіусу теплового впливу та інтенсивності теплового потоку. Було встановлено, що для високих ВЕУ характерне посилення процесів переносу теплової енергії під дією вітрових потоків і турбулентності атмосфери. Це призводить до збільшення площі потенційного термічного ураження та підвищує ризик виникнення вторинних осередків займання.

Найбільш небезпечним виявився тип ВЕУ потужністю 9,5 МВт із кількістю оливи до 3800 л. Особливістю даного сценарію є можливість руйнування несучої конструкції гондоли та подальше падіння палаючих фрагментів конструкції. Проведене моделювання показало, що у такому випадку зона теплового впливу суттєво перевищує нормативні значення безпечних відстаней, а радіус поширення небезпечної температури вище 250 °С може досягати понад 60 м. У результаті узагальнення експериментальних даних сформовано залежність між кількістю оливи в механічній частині ротора та радіусом небезпечного теплового впливу, що наведено на рис. 1.

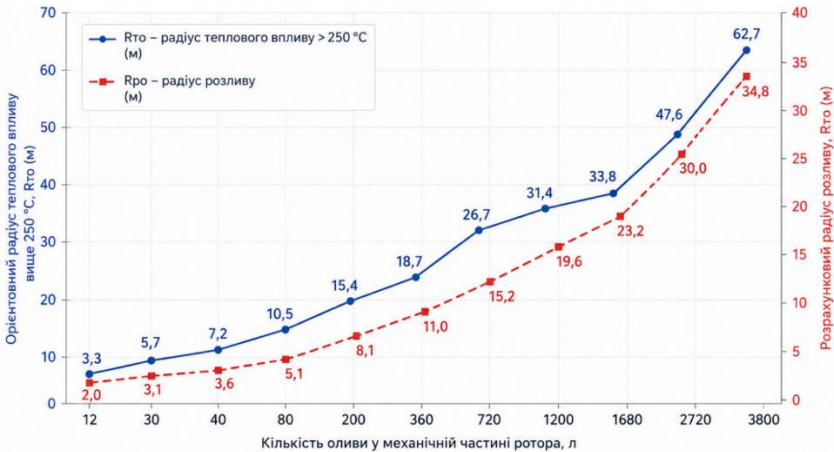


Рис. 1. Експериментальні дані утворення небезпечного радіусу температурного впливу пожежі та розрахункового радіусу зони розливу палива

Отримані дані свідчать, що різниця значень відстані небезпечного радіусу теплового впливу пожежі з врахуванням впливу вітрового навантаження та радіус розрахункового розливу в результаті реалізації сценарію «Руйнування-пожежа» може становити до 45 %, що значно впливає на кінцевий результат визначення безпечних протипожежних відстаней. При цьому слід розуміти, що в кожному окремому розрахунковому випадку утворення радіусу теплового впливу пожежі слід враховувати реальні топографічні характеристики місцевості та питому теплоту згоряння того чи іншого типу оливи, яка знаходиться в корпусі ротора ВЕУ. Врахування питомої теплоти згоряння оливи при визначенні значення безпечної протипожежної відстані від ВЕУ є ключовою характеристикою, що визначає енергетичний потенціал пожежної навантаги об'єкту.

[1]. Ballo Ya. V., Koval R. R., Sereda D. V., Neseniuk L. P. (2026). Дослідження процесів поширення пожежі від вітрової електроустановки за допомогою обчислювальної газодинаміки. [Study of fire spread processes from a wind turbine using computational fluid dynamics]. Комунальне господарство міст. Серія: Інформаційні технології та інженерія. № 1(196). С. 277–289. DOI: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2026-1-196-277-289> [in Ukrainian].

[2]. Sereda D. V., Ballo Ya. V. (2024). Удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок. [Improvement of the calculation method for determining fire safety distances for wind turbines]. Пожежна безпека. № 45. С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.09> [in Ukrainian].

[3]. Sereda D. V., Ballo Ya. V. (2025). Методика дослідження поширення пожежі від вітрової електроустановки до суміжних об'єктів. [Methodology for studying fire spread from a wind turbine to adjacent objects]. Комунальне господарство міст. Серія: Інформаційні технології та інженерія. № 1(189). С. 377–383. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-377-383> [in Ukrainian].

IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR ASSESSING THE FIRE SPREAD HAZARD FROM WIND TURBINES

The paper considers the assessment of fire spread hazard from wind turbines to adjacent objects. An improved calculation method for determining fire safety distances is proposed, taking into account wind turbine capacity, fire load, nacelle height, and wind effects. The obtained results can be used to clarify fire safety requirements for the placement of wind turbines.

УДК.624.193.4

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ УТВОРЕННЯ ПЕРШОЇ ТРИЩИНИ У ЗАЛІЗОБЕТОННІЙ СТІЙЦІ

Бекірова М. М., к.т.н., доцент

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м.Одеса

Метою роботи є одержання формул для визначення часу утворення першої тріщини у залізобетонній стійці.

Розглядаються стійки, які мають початкові недосконалісті у вигляді позacentрово доданого навантаження та стійки з початковим прогином. [1]

Проводимо аналіз формул, за якими визначаються напруги в бетоні, арматурі та висота стиснутої зони. [2]

У випадку стійки з початковим прогином маємо наступні формули.

$$\sigma_{a1}^{*r}(t) = E_a \cdot \frac{\pi^2}{l^2} [x_1^*(t) - a] [f^*(t) - f_0], \quad (1)$$

$$\sigma_{a1}^*(t) = E_a \cdot \frac{\pi^2}{l^2} [x_1^*(t) - h + a] [f^*(t) - f_0], \quad (2)$$

$$\sigma_{b1}^{*r}(t) = \frac{x_1^*(t)}{I_b} [(P - P_a) f^*(t) + P_a f_0], \quad (3)$$

$$\sigma_{\delta 1}^*(t) = \frac{x_1^*(t) - h}{I_{\delta}} [(P - P_a) f^*(t) + P_a f_0], \quad (4)$$

$$x_1^*(t) = \frac{h}{2} + \frac{P}{\frac{bh}{I_{\delta}} [(P - P_a) f^*(t) + P_a f_0] + \frac{P_a}{h_1^2} [f^*(t) - f_0]}. \quad (5)$$

А у випадку стійки з позацентрово доданим навантаженням маємо такі формули.

$$\sigma_{a1}^{*r}(t) = E_a \frac{\pi^2}{l^2} [x_1^*(t) - a] f^*(t), \quad (6)$$

$$\sigma_{a1}^*(t) = E_a \frac{\pi^2}{l^2} [x_1^*(t) - h + a] f^*(t), \quad (7)$$

$$\sigma_{a1}^{*r}(t) = \frac{x_1^*(t)}{I_{\delta}} [(P - P_a) f^*(t) + sP], \quad (8)$$

$$\sigma_{a1}^*(t) = \frac{x_1^*(t) - h}{I_{\delta}} [(P - P_a) f^*(t) + sP], \quad (9)$$

$$x_1^*(t) = \frac{h}{2} + \frac{P}{\frac{bh}{I_{\delta}} [(P - P_a) f^*(t) + sP] + \frac{P_a}{h_1^2} f^*(t)}. \quad (10)$$

Ці формули досить достовірні до моменту утворення першої тріщини, тому актуально знати час її утворення t_{τ} .

Перша тріщина утворюється в найбільш напруженому перерізі (в даному випадку в середньому за висотою). Станеться це тоді, коли напруги в крайніх волокнах розтягнутої зони бетону досягнуть значення подвоєної міцності бетону при розтягуванні. Це є умовою утворення першої тріщини.

Шляхом деяких перетворень вдається отримати величину прогину в момент утворення тріщини $f^*(t_{\tau})$, як для стійки з початковим прогином, так і для стійки з позацентрово доданим навантаженням. В обох цих випадках для знаходження $f^*(t_{\tau})$ одержуємо квадратне рівняння. [1]

$$B_0 f^{*2}(t_{\tau}) + B_1 f^*(t_{\tau}) + B_2 = 0. \quad (11)$$

В отриманому рівнянні перший коефіцієнт має однаковий вигляд для обох цих випадків.

$$B_0 = h(P - P_a) \left[\frac{bh}{I_{\delta}} (P - P_a) + \frac{P_a}{h_1^2} \right]. \quad (12)$$

Другий коефіцієнт і вільний член в цьому рівнянні мають різний вигляд. Для стійки з початковим прогином маємо.

$$B_1 = 2(P - P_a) \left[f_0 \cdot P_a \cdot \frac{bh^2}{I_0} - 2bhR_p - P \right] + \frac{P_a}{h_1^2} \left[hf_0 (2P_a - P) - 4I_0 R_p \right], \quad (13)$$

$$B_2 = f_0 P_a \left[\left(\frac{bh}{I_0} - \frac{1}{h_1^2} \right) (hf_0 \cdot P_a - 4I_0 R_p) - 2P \right]. \quad (14)$$

Для стійки з з позацентрово доданим навантаженням маємо.

$$B_1 = 2(P - P_a) \left[sP \frac{bh^2}{I_0} - 2bhR_p - P \right] + \frac{P_a}{h_1^2} (shP - 4I_0 R_p), \quad (15)$$

$$B_2 = \left(sP \frac{bh^2}{I_0} - 4bhR_p - 2P \right). \quad (16)$$

Після визначення прогину в момент появи тріщини знаходимо час її утворення t_τ .

Для стійок з початковим прогином та з позацентрово доданим навантаженням, бетон яких має повзучість, що підпорядковується законам спадкової теорії старіння, час утворення першої тріщини t_τ визначається шляхом підбору з відповідних виразів.

Якщо бетон стійки має повзучість, що підпорядковується законам теорії пружної спадковості, то вдається отримати формули для визначення t_τ в разі двох випадків, що розглядаються.

Для стійки з початковим прогином отримано.

$$t_\tau = \tau_1 - \frac{1}{\gamma [1 + c(1-r)]} \cdot \ln \left\{ 1 - \frac{1 + c(1-r)}{cr} \frac{P_2}{P} \left[\frac{f^*(t_\tau)}{f(\tau_1)} - 1 \right] \right\}. \quad (17)$$

Для стійки з з позацентрово доданим навантаженням отримано.

$$t_\tau = \tau_1 - \frac{1}{\gamma [1 + c(1-r)]} \cdot \ln \left\{ 1 - \frac{1 + c(1-r)}{cr} \left[\frac{f^*(t_\tau)}{f(\tau_1)} - 1 \right] \right\}. \quad (18)$$

Якщо бетон стійки є старіючим матеріалом і має повзучість, що описується теорією старіння, то і в цьому випадку вдається отримати формули для визначення t_τ .

$$t_\tau = -\frac{1}{\gamma} \ln \left(1 + \frac{1}{EA(1-r)} \cdot \ln \left\{ 1 - \frac{1-r}{r} \frac{P_2}{P} \left[\frac{f^*(t_\tau)}{f(0)} - 1 \right] \right\} \right), \quad (19)$$

$$t_{\tau} = -\frac{1}{\gamma} \ln \left(1 + \frac{1}{EA(1-r)} \cdot \ln \left\{ 1 - \frac{1-r}{r} \left[\frac{f^*(t_{\tau})}{f(0)} - 1 \right] \right\} \right). \quad (20)$$

Висновки. Таким чином, були отримані формули для визначення часу появи першої тріщини у стійці, бетон в якій підпорядковується законам спадкової теорії старіння, теорії пружної спадковості і теорії старіння.

- [1]. Орлов А.М. Вплив повзучості на стійкість стиснутих залізобетонних стрижнів. / Будівельні конструкції. – Вип.10. – К.: Будівельник, 1968.
- [2]. Ромашко В.М. Щодо визначення моменту утворення нормальних тріщин в згинальних залізобетонних елементах. / Будівельні конструкції. – Вип.74. – К.: Будівельник, 2011.

ABOUT THE TIME THE FIRST CRACK AT THE SLEEVE CONCRETE STATION WAS FINISHED

Thus, formulas were obtained for determining the time of appearance of the first crack in a column, the concrete in which obeys the laws of the hereditary theory of aging, the theory of elastic heredity, and the theory of aging.

УДК 539.3:624.046.3

ON THE BUCKLING OF ROD DUE TO AXIAL TENSION

Bekshaev S.

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

The loss of stability in the equilibrium of rod systems has long been well known and is caused almost exclusively by the compression of their elements. At the same time, the phenomenon of buckling of a rectilinear rod, under certain conditions, can also be caused by tensile forces. Some special cases have been described in the literature [1-4]. The problems considered there were aimed rather at demonstrating the principal possibility of loss of stability under tension than at outlining the development of any general theory. Therefore, these studies were limited to rods with constant flexural stiffness along their length. A rod working as part of a structure can change its position upon buckling, so that the point of application and direction of the tensile force do not remain unchanged relative to the rod. In the announced work, the buckling of a rectilinear rod with flexural

stiffness varying along its length, caused by an axial tensile force with a certain method of its application, is considered. The possibility of implementing this type of buckling for rods in a complex structure is established.

We consider a cantilever rod OL , rigidly fixed at one end and having a traverse at its free end — an absolutely rigid transverse rod perpendicular to the axis of the bending rod (Fig. 1). It is assumed that the traverse is perfectly smooth, which implies that equilibrium of the rod loaded with force P is possible only when force P and the traverse are perpendicular.

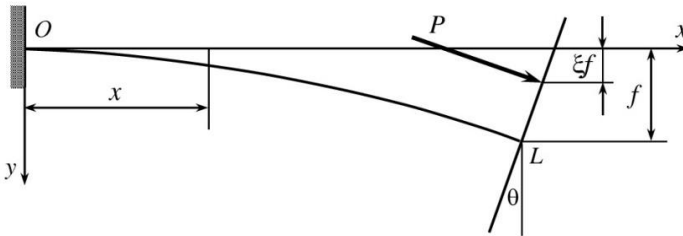


Fig. 1

The differential equation that determines the configuration $y(x)$ of a deformed rod in a linear approximation, taking into account the inclination of the force P , has the form

$$By'' = -M(x) = P\theta(1-x) - P(\xi f - y),$$

where

$B = B(x) = EJ$ – bending stiffness of a rod, variable along its length;

l – rod length;

P – the magnitude of the longitudinal tensile force perpendicular to the plane of the end section L of the rod;

$y = y(x)$ – deflection of a rod in section at a distance x from the clamped end;

$\varphi = \varphi(x)$ – slope of the section at a distance x from the clamped end;

f, θ – respectively, the deflection and the slope of the end section L of the rod;

$M = M(x)$ – bending moment in the section x .

ξ – the eccentricity coefficient of the tensile force, which determines the transverse displacement of its point of application at bending of the rod; it is accepted that $-\infty < \xi < 1$.

By introducing a new variable (bending moment) $M = -B\varphi'$ and twice differentiating with respect to x , we get at a homogeneous equation

$$M'' = (P/B)M \tag{1}$$

with corresponding homogeneous boundary conditions

$$M'(1) = 0, \quad M(0) + M'(0)l = -\frac{\xi}{1-\xi}M(1). \tag{2}$$

A qualitative analysis of the resulting eigenvalue problem led to the following conclusions.

1. For any ξ in the range $-\infty < \xi < 1$, there is a unique value P , $0 < P < \infty$, for which there is a nontrivial solution $M(x)$ to equation (1) that satisfies the boundary conditions (2). This value $P = P_{cr}$ represents the critical tensile force of the rod under consideration.

2. As ξ increases from $-\infty$ to 1, $P_{cr} = P_{cr}(\xi)$ increases monotonically from 0 to ∞ .

3. The shortening of a rod clamped at one end, with the corresponding transfer of the conditions of clamping to the end of the formed shortened rod, leads to an increase in the critical force, regardless of the law of distribution of bending rigidity along the length of the rod.

In [4], the behavior of a rod composed of two elastic rods similar to the one considered above was investigated. Each of these rods is rigidly clamped at one end and has a traverse at the opposite free end — an absolutely rigid rod element perpendicular to the axis of the rod. The rods are connected at their free ends using a slider — a device that equalizes the slopes of the connected end cross sections, but allows their relative sliding without friction in a direction perpendicular to the axes of the deformed rods at their connection (Fig. 2).

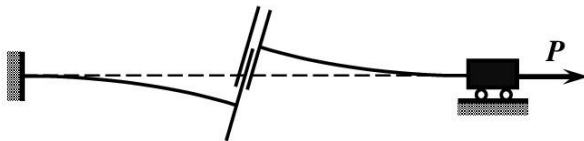


Fig. 2

At buckling, the rods act on each other with systems of forces distributed over the contact surface of the perfectly smooth traverses and directed perpendicular to the traverses. Both systems have resultants applied at some point K on this surface, which, according to the well-known law of equality of action and reaction, are equal in magnitude and opposite in direction (Fig. 3).

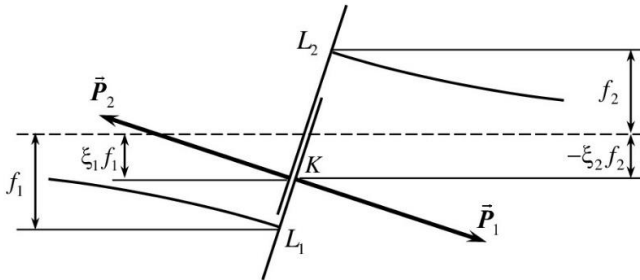


Fig. 3

This allows us to consider each of the rods as a rod shown in Fig. 2, with the corresponding value of ξ . If the point K does not lie on the axis of the undeformed rod (the dotted line in Fig. 3), it will be displaced from this axis in the same direction as the end of one of the rods. If this is L_1 , then, as can be seen from the figure, $\xi_1 > 0$, $\xi_2 < 0$. It was established above that the critical force increases monotonically with increasing ξ . This means that the critical force P of the compound rod satisfies the relations

$$P_{10} < P < P_{20},$$

where P_{10} and P_{20} are, respectively, the critical forces of the left and right rods at $\xi_1 = \xi_2 = 0$.

Above it was assumed that the clamping of the left end O of the rod is absolutely rigid. It can be verified that all the stated conclusions remain valid also for finite clamping rigidity.

- [1] H. Ziegler, *Principles of Structural Stability*, 1st ed. New York: Blaisdell Publishing Company, 1968.
- [2] Yu. M. Bardanov, *Kurs soprotivleniya materialov v strukturno-logicheskikh schemach*, K.: Vyscha shkola, 1988.
- [3] A. Gajewski, R. Palej, Stability and shape optimization of an elastically clamped bar under tension (in Polish), *Rozprawy Inzynierskie. Eng. Trans.* 22, 265–279, 1974.

- [4] D. Zaccaria, D. Bigoni, G. Noselli, D. Misseroni, Structures buckling under tensile dead load, *Proc. R. Soc. A* 467, 1686–1700. 2011 doi:10.1098/rspa.2010.0505.

ЩОДО ВТРАТИ СТІЙКОСТІ СТРИЖНЯ ВНАСЛІДОК ЙОГО РОЗТЯГАННЯ

В роботі розглядається втрата стійкості рівноваги пружного жорстко зацмленого прямолінійного консольного стрижня, завантаженого поздовжньою розтягуючою силою, прикладеною до поперечної траверси, жорстко закріпленої на вільному кінці стрижня перпендикулярно до його осі. Спосіб прикладання розтягуючої сили допускає вільне від тертя переміщення уздовж траверси її точки прикладання, а також зміну її напрямку в залежності від переміщення вільного кінця стрижня і нахилу траверси. На відміну від порівняно небагатьох відомих раніше постановок задач про втрату стійкості прямолінійних стрижнів, спричинену розтягуючими силами, у анонсованому дослідженні не накладається обмежень на розподіл згинальної жорсткості стрижня уздовж його довжини. Дослідження має теоретичний характер і спирається на якісний аналіз поведінки розв'язків лінійного диференціального рівняння вигину стрижня. З метою спрощення аналізу був виконаний перехід від традиційного для теорії стрижнів опису деформованого стану з використанням функції прогинів до функції згинальних моментів. Це дозволило привести розв'язання питання втрати стійкості стрижня до розгляду задачі на власні значення для лінійного однорідного диференціального рівняння другого порядку щодо згинальних моментів за однорідних граничних умов спеціального виду. Критичні сили визначаються як власні значення задачі, для яких існує розв'язок диференціального рівняння, що не дорівнює тотожному нулю і задовольняє граничним умовам. Встановлено, що при прийнятих у роботі способах прикладання розтягуючої сили завжди існує і до того ж єдина критична розтягуюча сила, при якій стрижень втрачає стійкість. Якісно описана залежність величини критичної сили від параметра, що характеризує зміну положення точки прикладання розтягуючої сили при згинанні стрижня. Встановлено також зростання критичної сили при укороченні стрижня шляхом видалення його частини поблизу зацмлення з її перенесенням у кінець новоствореного стрижня. Зіставлення отриманих результатів із дослідженнями, в тому числі експериментальними, інших авторів, показали, що розглянуті у статті умови можуть бути реалізовані для стрижнів як елементів складних конструкцій.

УДК 004.414.6:628.426.4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИПРОБУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ШУМОЗАХИСТУ

Чумаченко Т.В., д.т.н., проф.

Одеський національний політехнічний університет, Одеса

Беспалова А.В., д.т.н., проф.,

Книш О.І., к.т.н., доцент, Дашковська О.П., к.т.н., доцент

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м.Одеса

Для зниження рівня шуму на робочому місці можна використовувати різні методи. Наприклад, можна змінити графік роботи і відпочинку співробітників, організувати роботу в різних приміщеннях або обмежити час перебування в галасливих зонах. Однак у деяких випадках єдиним ефективним способом захисту від шуму є використання спеціальних навушників. Вони повинні бути підібрані з урахуванням індивідуальних особливостей і правильно використовуватися для запобігання пошкодження слуху. Вибір навушників також залежить від специфіки роботи. Наприклад, передача та прийом голосових команд, а також спеціальні рухи та рухи на робочому місці можуть знизити ефективність засобів індивідуального захисту та зробити всі вжиті заходи марними. Вибір засобів захисту слуху передбачає розрахунок рівня шуму з урахуванням його інтенсивності на основі параметрів шуму, присутніх на робочому місці. Звукоізоляція засобів захисту слуху вказується виробниками в інструкції по експлуатації. Часто ефективність захисту слуху відповідає реальній ефективності захисту в реальних умовах. Це пов'язано з тим, що на випробуваннях тестуються нові зразки. Встановлено, що використання захисних окулярів та респіратора може знизити ефективність шумозаглушення навушників на 9 дБ. В іншому дослідженні було вивчено вплив окулярів, шапок та довгого волосся на звукоізоляцію навушників. Було виявлено, що найбільший вплив на звукоізоляцію навушників надає кепка, знижуючи її на 10 дБ. Також було виявлено, що використання окулярів або довге волосся може знизити ефективність шумозаглушення навушників на 5 дБ. Експерименти проводилися на великій групі засобів захисту. В ході першого експерименту було встановлено, що використання захисних окулярів з навушниками призвело до зниження рівня захисту навушників на 14 дБ в діапазоні низьких частот.

Метою цього дослідження було визначити, наскільки одночасне використання навушників та мобільних екранів може вплинути на ефективність захисту слуху. На відміну від попередніх досліджень [1-4], в даній роботі використовувалася акустична випробувальна установка,

розроблена спеціально для оцінки акустичних властивостей засобів захисту слуху в поєднанні з пересувними екранами, здатними обертатися. Крім того, випробування включали широкий спектр як навушників, так і інших засобів індивідуального захисту. Дослідження проводилося на двох популярних моделях навушників, що використовуються в промисловості (для цілей даної роботи позначені як M1 і M2). Також були задіяні прозорі екрани, виготовлені зі скла, полікарбонату та акрилу. Випробувані навушники були протестовані з використанням різних засобів індивідуального захисту, представлених на рис. 1. Вибрані окуляри відрізнялися розмірами дужок, в той час як вибрані респіратори відрізнялися конструкцією прилеглих до обличчя елементів і типом головних ременів, використовуваних для регулювання. Випробувані ЗІЗ представлені на рис. 2.

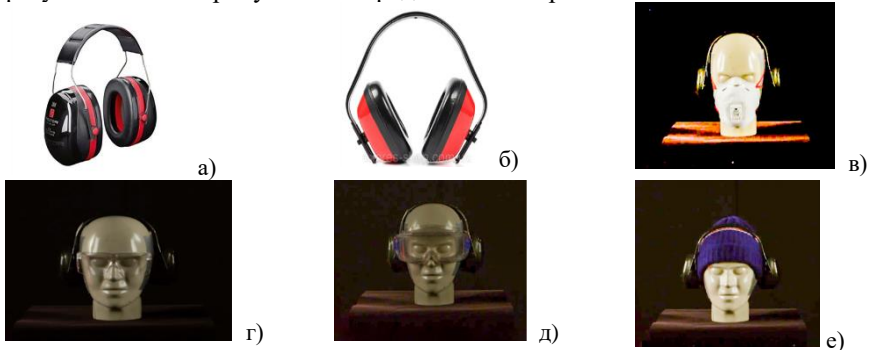


Рис. 1. Випробувані навушники а,б та інші випробувані засоби індивідуального захисту (в) одноразовий напівреспіратор S1, (г) захисні окуляри легкі S2, (д) захисна маска прозора G, (е) шапка тепла DR.

Випробування проводилися в ревербраційній камері, де було імітовано шум виробничої дільниці. У об'ємі камери встановлені колонки JBL 4208 (див.рисунок 3а). Звуки, які були в цій кімнаті, були дуже гучними. Вони були схожі на шум. Цей шум був вимірний спеціальним приладом-шумоміром Robotron 00024 (див.рисунок 3а). Він знаходився всередині голови манекена, навпроти вух. Простір між головою манекена і шумоміром було заповнено спеціальною піною Soudabond Easy Soudal. Другий шумомір встановлено зовні акустичної камери та дозволяє вимірювати рівень звуку всередині неї. Вимірювання проводилися в зонах акустичної тіні та на імпровізованому робочому місці всередині камери. Акустична тінь створювалася обертовими екранами перед та з боків манекена-працівника. Вимірювання проводилися в двох ситуаціях: з навушниками і з одним із зазначених вище засобів індивідуального захисту слуху, а також тільки з навушниками без будь-яких засобів захисту слуху. В результаті дослідження

з'ясувано, що вимірні рівні шуму є не абсолютними значеннями, а вимірні відносно двох шумомірів. Це означає, що помилка вимірювань незначна, тому що прилади належать до однієї серії.

Конструкція камери дозволяє екранам обертатися на 20 градусів в різні боки. Різниця в рівні звукового тиску під навушниками, коли вони використовуються, впливає на те, наскільки добре вони захищають слух людини. Перевірено кожен модель навушників тричі. Пристрій, що використовувався для перевірки, відповідає вимогам стандарту ANSI/ASA S12.42. У цьому пристрої є спеціальні деталі, які імітують анатомічні частини голови людини. Вони налаштовані на повторення анатомічних характеристик, що характерні людині. Під час експерименту не враховувався зміна температури тіла. Що в подальших випробуваннях буде виправлено. У шумомірі Robotron 00024 передбачений модуль стаціонарного живлення. Завдяки цьому можна проводити вимірювання без зупинок та не залежати від заряду батареї.

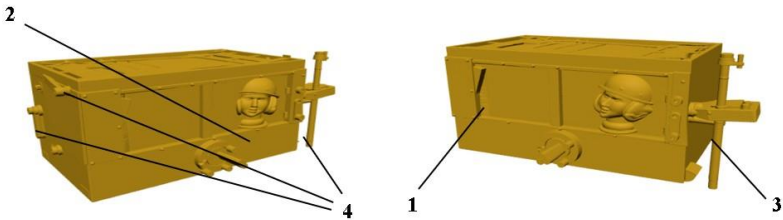
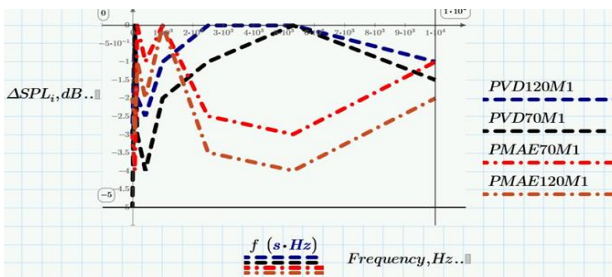


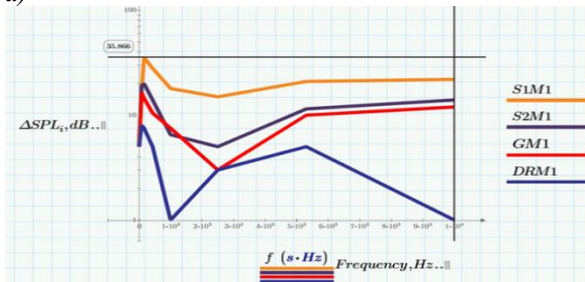
Рис. 2. Вимірювальна установка, що використовувалася для вимірювання рівня звукового тиску (SPL) під навушниками, що носять у поєднанні з окулярами: 1 — стінка з динаміком випромінювачем, 2 — шумомір, розташований в манекені, 3 — шумомір, що розташований ззовні, 4 - важелі обертових екранів

Щоб визначити вплив комбінації різних видів навушників впливають на рівень звуку під навушниками, проведено статистичний аналіз за допомогою непараметричного тесту Вілкоксона. Розрахунки були зроблені за допомогою програми MATCAD PREMIUM 11.00.0.00. На рисунку 3а показано зміну рівня звуку (SPL) в різних частотах, коли використовувались навушники M1 та інші ЗІЗ напівмаску S1, окуляри S2, прозору маску G і теплу шапку DR. Проконтрольовано зміну SPL, якщо захисний екран змінював просторову позицію по відношенню до голови манекена. При цьому враховано тип матеріалу екрану. Випробувані скляні, акрилові та полікарбонатові екрани. За результатами дослідів пересувних екранів найкращий ефект з R_w та STS продемонстрували комбіновані полівінілбутирлатові та акрилові склопакети що зорієнтовані у просторі під нахилом на 70° та 120° (позначені

PVD70, PVD120, PMAE70 та PMAE120 відповідно). При використанні навушників M2 було виявлено більший вплив екрана PVD70 на рівень звукового тиску (SPL) під навушниками. Позитивна динаміка зберігається на всіх діапазонах частот та в деяких випадках кратно перевищують базовий захист навушників. Але слід прийняти до уваги спрямовану залежність екранів від просторового розташування на робочій дільниці. Це обмеження доповнюється фактором замкненого простору, що може пригнічувати вихідне звукове поле та може його підсилити. Що і є базовим матеріалом для майбутніх досліджень.



a)



б)

Рис. 3. Різниця між рівнями звукового тиску (SPL) у 1/3-октавних смугах під навушниками, що використовуються як у поєднанні з іншими ЗІЗ, так і без них: S1M1 - одноразовий напівреспіратор, S2M1— захисні окуляри легкі, GM1— захисна маска прозора, DRM1— шапка тепла, PVD70M1, PVD120M1 — полікарбонатові екран, що встановлені під кутами 70° та 120° PMAE70M1, PMAE120M1— акрілові екрани, що встановлені під кутами 70° та 120°

1. CEN. EN 458:2016 Hearing Protectors—Recommendations for Selection, Use, Care and Maintenance—Guidance Document; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2016.
2. Azares, P.M.; Miguel, A.S. Assessing the use of hearing protection in industrial settings: A comparison between methods. *Int. J. Ind. Ergon.* 2013, 43, 518–525. [CrossRef]
3. Berger, E.H. Methods of measuring the attenuation of hearing protection devices. *J. Acoust. Soc. Am.* 1986, 79, 1655–1687. [CrossRef] [PubMed]
4. Biabani, A.; Aliabadi, M.; Golmohammadi, R.; Farhadian, M. Individual fit testing of hearing protection devices based on microphone in Real Ear. *Saf. Health Work* 2017, 8, 364–370. [CrossRef] [PubMed]

EXPERIMENTAL TESTING OF COMBINED NOISE PROTECTION SYSTEMS

In the workplace, in addition to noise, people may be exposed to other harmful factors. They therefore wear both hearing protection and other personal protective equipment (PPE). Incorrect use of this combination may increase the risk of hearing loss. The aim of this study was to determine whether the simultaneous use of earplugs and other PPE can affect the effectiveness of hearing protection. The study was conducted in a laboratory setting using an acoustic test rig. This rig replicated the anatomical shape of the head and was also equipped with ear simulators. The study was conducted on four models of headphones and three models of other personal protective equipment. We found that changes in sound pressure level (SPL) under the headphones when using a half-mask had virtually no negative impact on the effectiveness of hearing protection; the addition of mobile acoustic screen systems significantly improves the situation. When combined with mobile acoustic screens, the worker's protection increases by 47 dB. This figure exceeds the levels achieved when using safety goggles with thin arms and half-masks equipped with strap adjustment mechanisms located on the front of the user's head.

УДК 621.9.025:519.2

СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОСТІ РІЖУЧОГО ІНСТРУМЕНТА

**Чумаченко Т.В., д.т.н. проф., Вудвуд О.М., к.т.н. доц., Лінгур В.М.,
к.т.н. доц., Михайлов Є.П., к.т.н. доц.**

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса

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

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

У сучасному автоматизованому виробництві надійність різального інструменту один із ключових чинників, що визначають ефективність технологічного процесу. Стабільність інструменту та його знос безпосередньо впливають на точність обробки та формування систематичних похибок. Передчасний вихід інструменту з ладу або його надмірне зношування призводять до зростання відсотка браку, збільшення часу простоїв обладнання через позапланові перенастроювання та підвищення собівартості продукції. У зв'язку з цим розробка точних методів прогнозування стійкості інструменту є актуальним завданням для машинобудівної галузі.

Традиційні детерміновані методи оцінки зношування часто не враховують випадковий характер процесу різання. На практиці знос ріжучої кромки є випадковою величиною, що залежить від неоднорідності матеріалу інструменту та заготівлі, варіацій режимів обробки та динаміки системи «верстат-приспосовування-інструмент-деталь». Складність полягає у необхідності отримання достовірних прогнозів за обмеженого обсягу експериментальних даних.

Фізичний зміст процесу зносу найповніше розкривається через побудову адекватних моделей зносу. Стосовно ріжучого інструменту це питання набуває особливої актуальності, оскільки знос ріжучої кромки є випадковою величиною, що постійно змінюється в часі.

Оскільки величина зносу змінюється безпосередньо під час експлуатації, вона формує випадкову функцію. В результаті кожного окремого експерименту ця функція набуває конкретного вигляду, що зветься реалізацією. Сукупність таких дослідів утворює сімейство (ансамбль) реалізацій, аналіз яких дозволяє виявити приховані закономірності процесу.

Практичні дослідження [1] показують, що більшість ріжучих інструментів реалізації зносу близькі до лінійних. Це пов'язано з тим, що швидкість зносу конкретного інструмента залишається в середньому

постійною протягом усього періоду роботи. Використання лінійних випадкових процесів в якості математичної моделі доцільно з низки причин:

- модель точно відбиває фізичну специфіку процесу;
- потрібен мінімальний обсяг експериментальних даних для обчислення достовірних характеристик;
- спрощується дослідження надійності елементів та прогнозування їх ресурсу.

Аналіз зносу з позицій теорії ймовірностей дозволяє отримати якісну характеристику стану інструмента. Характер реалізацій безпосередньо відбиває фізичні закономірності і корелює з розподілом стійкості.

Однак, оскільки на знос впливають як початкова якість інструменту, так і випадкові варіації швидкості зношування, для визначення домінуючого фактора необхідно використовувати об'єктивні статистичні методи.

У роботі розглядається методика оцінки стабільності та зносостійкості свердел зі швидкорізальної сталі Р6М5 на основі апарату теорії випадкових функцій. Обґрунтовується застосування лінійних випадкових процесів для опису закономірностей зношування ріжучої кромки, що дозволяє скоротити обсяг експериментальних даних при збереженні необхідної точності прогнозування. У дослідженні використано комплекс статистичних методів, що включає перевірку однорідності початкової якості інструменту із застосуванням критерію Бартлетта, а також оцінку значущості факторів зношування на основі дисперсійного аналізу та критерію Фішера [2]. Розрахунок критерію свідчить про хорошу згоду емпіричних даних із теоретичним розподілом. Таким чином, розподіл стійкості свердла Ø9 мм може бути описаний як близький до гамма-розподілу з можливістю нормальної апроксимації (рис.1).

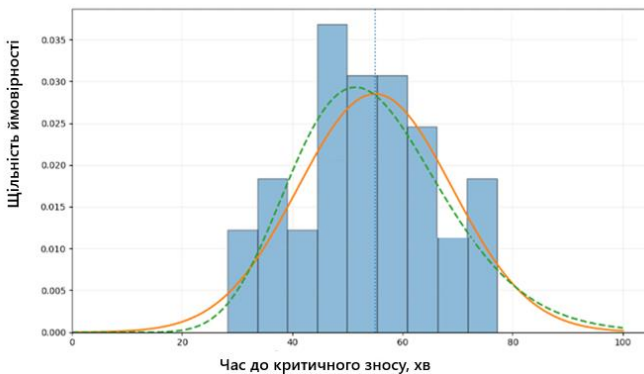


Рис.1. Розподіл стійкості свердел Ø9 мм із сталі Р6М5
Експеримент



Нормальний розподіл ($p=0,78$)
Гамма- розподіл ($p=0,41$)
Середня стійкість $T=55$ хвилин.

Висновки. Проведений комплексний статистичний аналіз процесу зносу свердел $\varnothing 9$ мм зі сталі P6M5 підтвердив ефективність використання теорії лінійних випадкових процесів з метою оцінки надійності різального інструменту. Основною перевагою запропонованого підходу є можливість отримання достовірних прогнозів за мінімального обсягу експериментальних даних. У ході роботи на етапі статистичного контролю за допомогою критеріїв Бартлетта, Фішера, Пірсона було доведено однорідність початкової якості інструменту та відсутність аномальних відхилень у процесі експлуатації. Встановлено, що емпіричні дані про стійкість інструменту (середній час роботи повністю $T=55$ хв при $S=14$ хв) демонструють високий ступінь згоди як з гамма-розподілом, так і з нормальним законом (рівень значущості $p=0,78$). Практична цінність дослідження полягає у можливості переходу від усереднених нормативів до об'єктивного планування термінів заміни інструменту за умов автоматизованого виробництва. Це дозволяє мінімізувати ризик виникнення браку через затуплення ріжучої кромки; проводити об'єктивну експертизу якості витратних матеріалів, які закупаються, виявляючи приховані дефекти партій.

[1] Chumachenko T., Bespalova A., Knush O. Increasing the Durability of Cutting Tools through Additional Low-Temperature Heat Treatment after Sharpening. // Materials Science Forum. – 2025. – Vol. 1168. – P. 25–35. <https://doi.org/10.4028/p-asup21>

[2] S. Stigler, Fisher and the 5% level, CHANCE 21 (4) (2008) 12. <https://doi.org/10.1080/09332480.2008.10722926>

STATISTICAL METHODS FOR ASSESSMENT AND PREDICTION OF CUTTING TOOL LIFE

The stability of a cutting tool and its wear patterns are key factors determining the formation of systematic and random errors during machining. Improving tool stability reduces wear rates, which contributes to maintaining machining accuracy parameters within tolerances for a long time and reduces equipment downtime associated with tool readjustment and resharpening. This paper examines a methodology for assessing the stability and wear resistance of P6M5 high-speed steel drills based on the theory of random functions. The use of linear random processes to describe cutting edge wear patterns is substantiated, which allows for a reduction in the amount of experimental data while maintaining the required prediction accuracy. The study's results allowed for the establishment of tool life distribution parameters, which allows for a quantitative assessment of the process reliability and the substantiation of maximum permissible wear values for improving the efficiency of machining.

УДК 624.138.23:624.012.25

ВИКОРИСТАННЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НАТ ЗСУВНИХ І ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕРИТОРІЯХ, СКЛАДЕНИХ ЛЕСОВИМИ ГРУНТАМИ

**Біда С. В., к. т. н., доц., Яхін С. В., к. т. н., доц.,
Муравльов О. В., к. т. н., доц., Петраш Р. В., к. т. н., доц.**
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава

Внаслідок геологічної діяльності великих річок рівнинна частина України являє собою систему декількох плато, що розділені долинами річок. В свою чергу, великі плато розділяються на менші внаслідок діяльності малих річок, їх приток, джерел та тимчасових потоків води. Заглиблюючись у лесові відклади річки формують досить круті схили з перепадами висот у декілька десятків, а то й сотень метрів. Значна крутизна і висота схилів, на які виходять лесові відклади, створюють ідеальні умови для розвитку зсувних процесів [1]. Додатковим фактором, що сприяє катастрофічному розвитку зсувних процесів є підняття рівня ґрунтових вод, викликане як природними, так і техногенними (антропогенними) чинниками [2].

Полтавське лесове плато є однією з територій геологічна будова якої характерна для центральної України [3]. З поверхні плато залягають четвертинні леси та лесовані суглинки з прошарками похованого ґрунту потужністю до 20 м. Підстилаються вони четвертинними червоно-бурими глини твердої і напівтвердої консистенції потужністю 10–12 м, які є водотривом для ґрунтових вод. Особливістю інженерно-геологічної будови Полтавського лесового плато є наявність улоговин у покрівлі водотривкого шару, який розміщується на глибині близько 16–20 м від поверхні землі. Улоговини мають різноманітні розміри, форму та походження [4, 5], але характерною їх особливістю є утворення в них потоків ґрунтових вод, що розвантажуються з плато на схили річкових долин, ярів та балок. У місцях виходів ґрунтових потоків і розвиваються зсувні процеси.

Підвищення стійкості схилів, особливо в умовах забудованої території, шляхом покращення фізико-механічних характеристик ґрунтів є одним із найбільш актуальних задач геотехнічної інженерії, що постали перед будівельниками останнім часом. До способів уникнення чи припинення розвитку зсувів відносяться методи зміцнення ґрунтів різноманітними способами, наприклад за рахунок подання у ґрунт в'язучої речовини [6, 7], або ж підвищення стійкості масиву ґрунту, наприклад за рахунок його армування.

Зневоднення ґрунту та електрохімічне закріплення актуальні лише в умовах високого рівня ґрунтових вод і в даних умовах потребують постійних затрат. Окрім того, електрохімічне закріплення потребує значних об'ємів металу (електроди чи металеві палі, тощо). Термічна обробка виконується одноразово, забезпечуючи уникнення у подальшому прояву просадочних властивостей ґрунту, однак потребує значних затрат і на протилежність від зневоднення не використовується на підтоплених територіях. Таким чином, зважаючи на недоліки вказаних методів, одним із найбільш розповсюджених і простих у виконанні є закріплення ґрунтів, що здійснюється нагнітанням у ґрунт в'язучих речовин, а найбільш доступним і розповсюдженим в'язучим є цемент.

Струменеві технології необхідно обережно використовувати на забудованих територіях, оскільки струмінь рідини, поданий під значним тиском, може зруйнувати ґрунтову основу існуючих будівель.

Тому для вирішення проблеми закріплення ґрунтів було акцентовано увагу на бурозмішувальній технології, яка дозволяє з одного боку контролювати якість утворення ґрунтоцементної суміші шляхом регулювання кількості проходів по довжині ґрунтоцементного елемента, підбору необхідної кількості води для різної консистенції ґрунту та регулювання необхідного об'єму цементного розчину. Використання такої технології також більш надійно забезпечує постійність поперечного перерізу ґрунтоцементного елемента по всій його довжині.

Влаштування ґрунтоцементного елемента за допомогою бурозмішувальної технології [8] виконується буровим агрегатом, який замість шнеку використовує пустотілу штангу з спеціальною буровою насадкою зі стаціонарними лопатями (ножами) (рис. 1).

Завдяки розпушуванню ґрунту відбувається руйнування зв'язків між окремими його складовими частинами та утворення порожнин, які у подальшому забезпечуватимуть рівномірне розповсюдження водоцементного розчину. Після виконання розпушення у робочу зону бурової насадки крізь вертлог та пустотілу штангу паралельно з опусканням (чи підніманням) штанги розчинонасосом нагнітають водоцементну суспензію. Таким чином відбувається ретельно змішування водоцементного розчину із пухким ґрунтом.

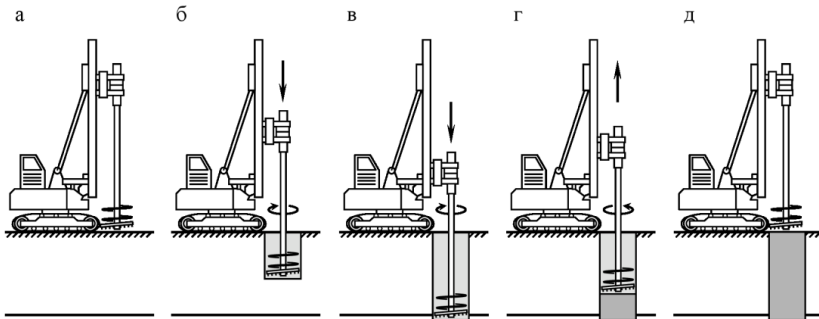


Рис. 1. Технологія влаштування ґрунтоцементного елемента бурозмішувальним методом: а) – встановлення бурового агрегату в робоче положення; б) – початок занурення штанги з насадкою в ґрунтову основу з одночасною подачею з водоцементної суспензії; в) – досягнення необхідної глибини закріплення; г) – підйом штанги з насадкою з одночасним змішуванням ґрунту з водоцементною суспензією; д) – виготовлений ґрунтоцементний елемент

Рецептура розчину, що подається через штангу, повинна враховувати вологість ґрунту і може бути використана для підсилення ґрунтів, розміщених нижче рівня ґрунтових вод. Таким чином можна зробити висновок про універсальність методу закріплення ґрунтової основи ґрунтоцементними елементами, виконаними за бурозмішувальною технологією, за наявності просадочних і слабких, насичених водою ґрунтів.

Наявність у ґрунтоцементних елементах досить високих показників з точки зору їх водонепроникності дозволяє використати їх для влаштування протифільтраційного екрану, який буде служити бар'єром для підземних потоків ґрунтових вод.

З іншого боку, для боротьби зі зсувними процесами часто застосовують досить прості рішення у вигляді дренажних каналів, засипаних фільтруючим матеріалом (гравієм, щебенем, шлаком тощо). Недоліком таких конструкцій є їх недовговічність, адже з часом, за рахунок кольматації, ці канали замулюються, перестають виконувати функції дренажу, що, у свою чергу, призводить до обводнення навколишнього масиву ґрунту і подальшому розвитку зсувних процесів.

У даному випадку конструкцію дренажних каналів можна вдосконалити, влаштовуючи кожен стінку каналу як ряд ґрунтоцементних елементів, виконаних у дві черги у шаховому порядку з перекриттям сусідніх.

Після влаштування стінок канами ґрунт між ними виймається а порожнина засипається дренажним матеріалом, наприклад щебенем. У випадку появи ґрунтових вод вони перехоплюються у верхній частині схилу з використанням протифільтраційних екранів і спрямовуються у дренажні канами, а після виходу з них у підніжжі схилу збираються у зливову каналізацію для організованого водовідведення. Така конструкція дозволяє у будь-який момент замінити щебенеve засипання без проведення зайвих земляних робіт. Окрім того по довжині канами досить легко встановити до засипання щебеню вертикальні труби для постійного моніторингу за рівнем води у канами.

Таким чином, зменшити ризик виникнення і масштаби зсувних явищ, або ж і зовсім уникнути їх появи можна за рахунок використання ґрунтоцементних елементів, які мають декілька переваг у порівнянні з іншими заходами при влаштуванні їх у товщі лесових відкладів:

- зміна рецептури водоцементної суміші дозволяє виконувати влаштування ґрунтоцементних елементів у ґрунтах будь-якої консистенції;
- влаштування ґрунтоцементних елементів не потребує спеціального обладнання;
- залежно від розміщення слабких шарів ґрунту за глибиною можливе влаштування ґрунтоцементних елементів змінного перерізу;
- водонепроникні властивості ґрунтоцементу дозволяють влаштовувати як протифільтраційні зависи для тимчасового чи постійного захисту улоговин від потрапляння до них ґрунтових вод, так і створювати дренажні системи для відведення ґрунтових вод, які не потребують складного обслуговування.

- [1]. Демчишин М. Г. 1992, *Сучасна динаміка схилів на території України (інженерно-геологічні та екологічні аспекти)* (Київ: Наукова думка), 256
- [2]. Bida S. V., Kuts O. V. 2015, The influence of groundwater flow effect on changes of loess soil strength characteristics, *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. Vol. **23** (1), 3-16 (DOI: <https://doi.org/10.15421/11152001>)
- [3]. Великодний Ю. Й., Біда С. В., Ягольник А. М., Пашенко О. Ю., Житник В. С. 2012, Особливості геоморфологічної та геологічної будови Полтавської області, *Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво)*. 4 (34) Т. 2, 50–55
- [4]. Біда С. В. 2011, Особливості зсувних процесів на схилах річкових долин, *Будівельні конструкції: міжвідомчий наук.-техн. зб.* 75, 2, 371–377
- [5]. *Engineering geodynamics of Ukraine and Moldova (landslide geosystems)* 2012, Vol. **1**, edited by Rudko G. I., Osiyuk V. A., (Chernovtsy: Bukrek), 592
- [6]. Axtell P. J., Stark T. D. 2008, Increase in Shear Modulus by Soil Mix and Jet Grout Methods, *DFI Journal – The Journal of the Deep Foundations Institute*, Vol. **2**(1) (DOI: 10.1179/dfi.2008.002)

- [7]. Consoli N. C., Foppa D., Festugato L., Heineck K. S. 2007, Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. **133**(2) (DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197))
- [8]. Біда С. В., Муравльов В. В., Попович Н. М., Яхін С. В. 2025, Досвід підсилення лесових основ (на прикладі Полтавського лесового плато), *Таврійський науковий вісник. Технічні науки*, Вип. **4** (2) 250–259 (DOI: 10.32782/tnv-tech.2025.4.2.27)

USE OF SOIL–CEMENT ELEMENTS IN LANDSLIDE AND LANDSLIDE-PRONE AREAS COMPOSED OF LOESS SOILS

The paper presents various aspects of the use of soil–cement elements in landslide and landslide-prone areas composed of Quaternary loess deposits. An analysis of the causes triggering the development of landslide processes is carried out from the standpoint of the specific features of engineering-geological and hydrogeological conditions on the slopes of river valleys. Particular attention is focused on the occurrence of loess deposits over impermeable strata and on changes in their strength characteristics under the action of groundwater discharge flows onto slopes, which constitute the primary cause of landslide development. Methods for improving slope stability using soil–cement elements are considered, both for the direct reinforcement of the loess deposit mass and for its protection against the adverse effects of groundwater. The paper presents the technology for the installation of soil–cement elements of various shapes using the deep soil mixing method, which enables construction works to be performed in soils ranging from stiff to fluid consistency. It is also demonstrated that the low permeability of soil–cement allows soil–cement elements to be used for the construction of cutoff walls and drainage systems. The indicated application aspects make soil–cement elements fairly versatile in terms of their use in landslide and landslide-prone areas.

УДК 624.042

ЗБІРНІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННІ ПЕРЕКРИТТЯ ПІД ДІЄЮ ВИБУХУ НА МАЛИХ ВІДСТАНЯХ ВІД НИХ

Біляєв М.А., аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

Дослідження проводилося у декілька етапів. Одним з них стало створення детальної моделі збірного сталезалізобетонного перекриття по сталевим балкам з круглими перфораціями стінки з подальшим дослідженням на дію вибуху на відстані 0.5м від поверхні плити 50 кг тротилу. Плити – залізобетонні збірні, об'єднані зі сталевими балками арматурними петлями з подальшим омоноличування стика (Рис. 1). Перекриття для нормальних умов експлуатації розраховано на корисне

навантаження 5кН/м^2 і додаткове постійне навантаження 1кН/м^2 , що разом із вагою плити складає $4,8\text{кН/м}^2$. Розрахунок виконано згідно EN 1994-1-1 (Єврокод 4) [1, 2].

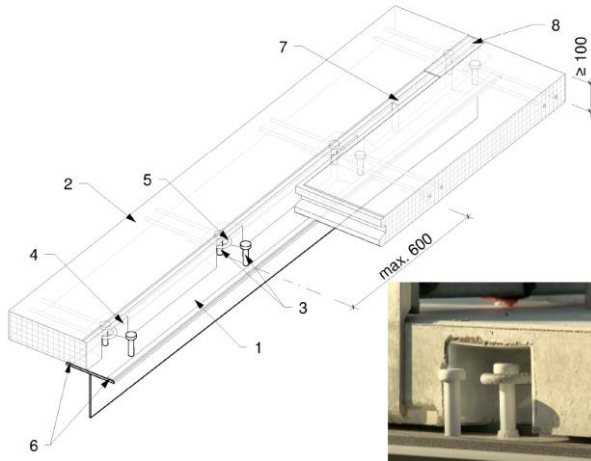


Рис. 1. Конструктивне рішення повністю збірного сталезалізобетонного перекриття

Цей етап дозволив дослідити характер руйнування і визначити основні напрямки підвищення стійкості до вибухів. Було встановлено дві характерні зони руйнування: Зона А – локального руйнування перекриття і Зона Б – відриву зсувних упорів (стад-болтів) сталевої балки від плити.

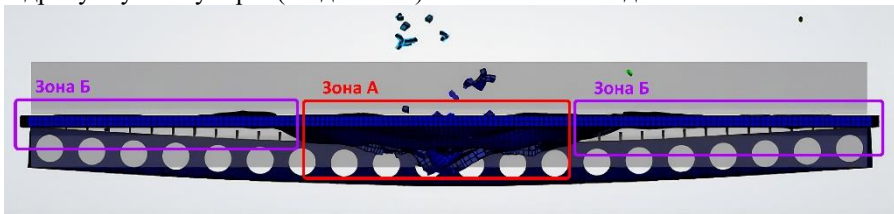


Рис. 2. Характер руйнування з двома характерними зонами А і Б

За результатами цього етапу напрямками вдосконалення і подальшого дослідження визначено розрахунок мінімальних товщин плити для виключення пробиття (Зона А) і арматурні перемички між стад-болтами та петлями плити (Зона Б).

Другою частиною дослідження було визначення залежності пікового надлишкового тиску на перекриття в залежності від кількості вибухової речовини і відстані точки детонації від поверхні перекриття. Прийнято

спрощенні моделі без моделювання перфорацій і заміною стад-болтів і арматурних петель з'єднанням поверхнь типу «bonded» (об'єднані). Для заряду 50 кг на відстанях 0.5, 1.0, 1.5 і 2.0 м проведено порівняння моделей з різними жорсткістними характеристиками та методиками UFC 3-340-02 [3] і формулами М. А. Садовського [4, 5]. Останні, будучи методиками для більших відстаней, очікувано показали перевищення до 9.67 і 5.50 разів відповідно. Особливо на найменших відстанях у 1.0 і 0.5 м. Це підтвердило необхідність окремих залежностей для надлишкового тиску на малих відстанях.

Вищий тиск, найбільш стабільні і послідовні результати отримано для перекриття по балкам із збільшеною товщиною плити у 300 мм. Цей варіант в подальшому використано при моделюванні вибуху зарядів у 50, 75 і 100 кг на відстанях 0.5, 1.0, 1.5 і 2.0 м від поверхні плити. Залежності надлишкового тиску від відстані показали нелінійний характер, що краще описується степеневу функцію, а залежності від надлишкового тиску – ближчий до лінійного і навіть прямо пропорційного. Остаточним і найбільш прикладним результатом дослідження стала апроксимація залежності одразу від двох параметрів через модифіковану приведену відстань Z' (1) та альтернативно напрямку через двухетапну апроксимацію залежностей від відстані (2):

$$P = 0.3719 \cdot Z' - 1.034 \quad (1)$$

$$P = (0.50 \cdot W - 4.89) \cdot R^{-1.50} \quad (2)$$

де: $Z' = R^{1.5}/W$, R – відстань, м; W – кількість вибухової речовини, кг.

[1] European Committee for Standardization. (2004). EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 118 p., Current.

[2] Dujmović, D., Androić, B., Lukačević, I. (2015). Composite structures according to Eurocode 4: Worked examples. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 924 p.

[3] Department of Defense (2008). UFC 3-340-02: Structures to resist the effects of accidental explosions. Washington, DC: U.S. Department of Defense, 1867 p.

[4] Барабаш, М. С., Костира, Н. О., Максименко, В. П., Бармін, І. В. (2023). Моделювання динамічних навантажень вибухового типу в задачах дослідження міцності будівельних конструкцій з використанням ПК ЛІРА-САПР. Наука та будівництво, 4(38), 20-27. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3>

[5] Каплюк, О. М., Нікітченко, В. І., Кірдей, Л. М., Терновський, А. Ю., Брайко, В. В. (2022). Особливості дослідження босприпасів з термобаричними вибуховими речовинами. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, 1(11), 55–65. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.11.2022.07>

PREFABRICATED COMPOSITE FLOORS SUBJECTED TO BLAST AT SMALL DISTANCE FROM THEM

At first stage research included precisely detailed numerical model of 50 kg TNT charge detonating at 0.5m from the surface of the 150mm precast slab supported by steel cellular beams. Composite action (bond) between precast slab and beam is provide by means of rebar loops protruding from slab. Analysis identified two dominant failure zone: local slab penetration zone and shear studs detachment zone. Obtained results allowed to determine two ways of increasing blast resistance: increasing slab thickness and locking rebar loops with shear stud by special links. Further analyses with 50, 75 and 100 kg of explosives at 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0m were performed to compare results with common practices and to identify relationship between peak overpressure, amount of explosives and distance to detonation point. UFC 3-340-02 and M.A. Sadovsky formulas for small distances demonstrated significant pressure overestimation up to 9.67 and 5.50, respectively. Final result included new overpressure formula optimal from accuracy and simplicity points of view.

УДК 658.15:005.934

ЗАСТОСУВАННЯ ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ ПРИ ПОРІВНЯННІ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПАНІЙ

Васильєва Н.С., к.ф.-м.н., доц.

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Васильєв О.Б., к.ф.-м.н., доц., Давидов К.А., бакалавр

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса

Запропоновано новий підхід до оцінки інвестиційної привабливості підприємств, заснований на використанні методів факторного аналізу. Сутність підходу полягає у узагальненні показників успішності виробничої діяльності підприємств за допомогою методів факторного аналізу, що дозволяє значно скоротити їх кількість і спростити процедуру порівняння. Для реалізації методів факторного аналізу було розроблено мобільний застосунок на мові програмування Dart у поєднанні з фреймворком Flutter. Такий вибір зумовлений низкою переваг: високою швидкістю розробки, зручним інструментарієм для побудови графічного інтерфейсу користувача, а також можливістю розгортання застосунку як на мобільних пристроях (Android, iOS), так і на настільних операційних системах (Windows, Linux, macOS). Однак, варто зазначити, що екосистема Dart наразі не має повноцінних математичних бібліотек, подібних до NumPy в Python чи Eigen у C++. У зв'язку з цим, усі необхідні функціональні модулі для обробки

числових даних довелося розробляти самостійно. Такий підхід забезпечив повну контрольованість над точністю розрахунків. Графічний інтерфейс користувача був реалізований із використанням засобів фреймворку Flutter. Завдяки декларативному стилю опису віджетів та підтримці «гарячого перезапуску» (hot reload) він дає можливість будувати адаптивні та інтерактивні інтерфейси, що значно пришвидшує процес тестування та налагодження. У застосунку реалізовано: введення початкових даних, відображення налаштування кожного методу, відображення кожного етапу розрахунків. Таким чином, було створено повнофункціональний інструмент для реалізації методів факторного аналізу, який поєднує точність розрахунків із сучасним користувацьким інтерфейсом. Застосунок був апробований при порівнянні інвестиційної привабливості 30 будівельних компаній за 5 показниками. За допомогою факторного аналізу вдалося замість 5 первинних показників отримати два узагальнені фактора, за значеннями яких були обрані дві найбільш привабливі будівельні компанії.

APPLICATION OF FACTOR ANALYSIS IN COMPARISON OF THE INVESTMENT ATTRACTIVENESS OF CONSTRUCTION COMPANIES

A new approach to assessing the investment attractiveness of enterprises is proposed, based on the use of factor analysis methods. The essence of the approach is to generalize the indicators of the success of the production activities of enterprises using factor analysis methods, which allows significantly reducing their number and simplifying the comparison procedure. To implement the factor analysis methods, a mobile application was developed in the Dart programming language in combination with the Flutter framework. The application was tested by comparing the investment attractiveness of 30 construction companies according to 5 indicators. Using factor analysis, instead of 5 primary indicators, it was possible to obtain two generalized factors, according to the values of which the two most attractive construction companies were selected.

УДК 691.32:620.18:519.24

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ ДЕКОРАТИВНИХ ВИРОБІВ

Вировой В.М., д.т.н., проф., Довгань О.Д., к.т.н., доц
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Проектування будівельних виробів і конструкцій включає в себе процес цілеспрямованого призначення матеріалів з певними властивостями. В рамках існуючих парадигм прийнято, що інтегровані властивості

багатокомпонентних матеріалів в значній мірі залежать від властивостей індивідуальних компонентів. В той же час встановлено, що вкорінення в інженерну практику ідей та методів системного підходу дають підстави стверджувати, що властивості як окремих складових, так і системи в цілому, залежать від їх структурного оформлення. Показано, що перманентний процес структурних трансформацій веде до самозародження елементів структури, які не входять до переліку вихідних складових матеріалів, але є визначальними при формуванні їх властивостей. До таких елементів слід віднести, як свідчить проведений аналіз, несущільності у вигляді пор, капілярів, внутрішніх поверхонь розділу та тріщин, які є присутніми в якості елементів структури на всіх рівнях структурних неоднорідностей. Тому важливою і нагальною задачею слід вважати задачу з аналізу механізмів багатоосередкового структуроутворення на різних рівнях неоднорідностей з метою регулювання спонтанними процесами самозародження нових елементів структури шляхом направленої зміни якісного та кількісного складів вихідних складових.

В якості об'єктів вивчення та аналізу прийняті декоративні матеріали, вироби та конструкції. Це пов'язано з тим, що саме вони формують просторову, соціальну, естетичну та художню виразність довкілля. Складна геометрична форма таких виробів накладає певні вимоги до матеріалів, оскільки матеріали повинні забезпечувати вимоги багатофункціональності, естетичної виразності, технологічності виготовлення, стійкості в несприятливих умовах до дії навколишнього середовища. Постійна зміна погодних умов провокує виникнення та розвиток вологісних та термічних деформацій усадки та набухання. Знакозмінні об'ємні деформації, особливо у виробах складної геометричної форми, можуть призвести до передчасної появи несущільностей, що спроможні спричинити втрату функціонального призначення та порушення цілісного образу декоративного елемента. Проведений аналітичний аналіз дозволив виявити елементи, які здатні підвищувати тріщиностійкість матеріалів і виробів за рахунок перерозподілу знакозмінних об'ємних деформацій. До таких елементів фахівці відносять дискретну арматуру. В нашому випадку, для збереження та забезпечення кольорової гами виробів в якості дискретної арматури прийняті лугостійкі скляні волокна різних розмірів.

Декоративні матеріали слід вважати різновидом композиційних будівельних матеріалів з поліструктурною будовою. Це означає, що в них співіснують та співпрацюють мікрорівень, макрорівень та рівень виробу (конструкції). Подібна будова ґрунтується на принципово різних механізмах організації структури кожного рівня. На мікрорівні реалізуються процеси багатоосередкового структуроутворення за рахунок неврівноважених міжчасткових взаємодій. Макрорівень утворюється за рахунок взаємодії

матричного матеріалу із заповнювачами. Мікро- та макрорівні знаходяться під невинним впливом технологічних об'ємних деформацій, характер розподілу яких залежить виключно від геометричних характеристик виробу. Принципово різні механізми організації структури потребують різні моделі при аналізі процесів структуроутворення на кожному рівні.

Вплив скляної фібри на організацію структури поліструктурних матеріалів починає проявлятися вже при приготуванні сумішей – їх об'ємна кількість не повинна приводити до самовільного утворення самостійних осередків. Тому при розробці моделей накладали обмеження по кількості лінійних елементів. Крім того враховували, що для якісного армування виробів складної форми потрібно використовувати гібридну фібру при різних співвідношеннях розмірів окремих елементів.

До унікальних особливостей дисперсного армування слід віднести наявність лінійних елементів одночасно на всіх рівнях неоднорідностей, що означає що при розробці моделей будь-якого рівня в них мають бути присутні лінійні елементи. При виборі модельних матеріалів потрібно виходити з того, що запропоновані моделі повинні дати можливість проаналізувати вплив фібри на процеси багатоосередкового структуроутворення, зародження та розвиток нових елементів у вигляді несущальностей різних видів, вплив геометричних характеристик матеріалів і виробів на розподіл технологічних (початкових, залишкових, генетичних, наслідкових) локальних та інтегральних деформацій.

Багатоваріантність механізмів багатоосередкового структуроутворення потребує розширення інформаційного простору, що в свою чергу, спонукає до розробки різних за призначенням моделей. В загальному випадку мікроструктуру можна уявити у вигляді ліофобної полідисперсної та полімінеральної висококонцентрованої системи з ліофільною внутрішньою поверхнею розділу. Таке уявлення дає можливість урізноманітнити якісний і кількісний склад мікроструктури та застосовувати графоаналітичні методи при аналізі процесів структуроутворення і структуро-перетворення.

В якості дисперсійного середовища при створенні фізичних моделей приймали рідини з різною в'язкістю. Це дозволило в широкому діапазоні змінювати концентрацію часток дисперсної фази та варіювати зміною їх природи та розміром. Для аналізу процесів зародження та розвитку нових елементів у вигляді несущальностей прийняті цементно-водні та водо-глиняні композиції із різними водо-твердими відношеннями і кількістю лінійних елементів різних складів.

Макроструктура моделювалася шляхом введення в матричний матеріал моделей заповнювачів у вигляді кубів. В якості матричного матеріалу використовували все різноманіття моделей мікроструктури. Використання заповнювачів провокує виникнення залишкових деформацій, що спонукало

до застосування фотопружних матеріалів (в нашому випадку епоксидної смоли ЕД-20) з одночасним введенням різної кількості дискретних лінійних елементів різного складу.

Як вже відмічалось, характерною особливістю декоративних елементів і виробів є їх геометричні форми. Відомо, що розподіл інтегрованих залишкових деформацій залежить виключно від геометричних характеристик. Тому були прийняті моделі декоративних виробів різної форми при постійній площі поверхні (було проаналізовано 10 моделей).

При реалізації експериментальних робіт з моделями контролювали змінні в часі наступні параметри:

- кінетику утворення дискретних структурних блоків (кластерів);
- якісний та кількісний склад кластерів;
- фрактальну розмірність кластерів;
- траєкторії руху часток дисперсної фази;
- траєкторію переміщень індивідуальних кластерів при кластер-кластерних взаємодіях;
- зміну об'єму та маси;
- зародження та розвиток несучільностей;
- утворення структурних блоків;
- розвиток сітки несучільностей, їх ширину розкриття та протяжність;
- появу та розвиток локальних та інтегральних технологічних деформацій;
- формозміни зовнішніх і внутрішніх поверхонь розділу;
- коефіцієнти пошкодженості та їх зміну в залежності від складу матеріалу та геометричних характеристик.

Порівняльна оцінка параметрів моделей з фіброю та без неї дало змогу оцінити роль дискретної арматури в процесах структуроутворення декоративних матеріалів і виробів.

Відомо, що ліофобні дисперсні системи здатні самовільно зменшувати надлишкову поверхневу енергію шляхом зменшення площі міжфазних поверхонь за рахунок об'єднання часток дисперсної фази в структурні агрегати (кластери). Взаємодія дискретних часток залежить від співвідношення їх розмірів. Тому лінійні елементи, розмір яких набагато більший розмірів вихідних зерен, автоматично виступають в ролі осередків структуроутворення. Аналіз показав, що в результаті взаємодій «частка-волокно» утворюються різні за видом структурні ансамблі. До найбільш характерних слід віднести наступні структурні об'єднання:

- типу «гантелі» у випадку коли дискретні частки групуються на торцях волокна;
- типу «шашлик», вздовж волокна утворюються кластери різних складів;

– змішаного типу у випадку коли кластери утворюються як вздовж волокна, так і по його торцям.

Спостерігається також взаємодія волокон між собою з одночасною взаємодією з дискретними частками. Встановлено також прискорення процесів структуроутворення систем з фіброю порівняно з системами в яких відсутні лінійні елементи, що провокує появу несуцільностей в глиняних та цементних композиціях. Поява несуцільностей, як нових елементів структури змінює подальші процеси організації структури. Відмічено, що в дисперсно-армованих композиціях ширина розкриття тріщин в 5-10 разів менше порівняно з композиціями без тріщин. Розвиток несуцільностей за рахунок їх взаємовпливу та взаємодії веде до утворення структурних блоків, що призводить до зміни уявлення про матеріал як неперервне середовище.

Подібний характер структуроутворення зберігається на рівні макроструктури. Спостерігається цікавий феномен впливу геометричних характеристик чарунок бетону на характер структуроутворення матричного матеріалу. Це закладає певні умови їх взаємодії та взаємодії різних рівнів структури, особливо з урахуванням одночасної присутності лінійних елементів на мікро- та макрорівнях. Встановлено вплив фібри на розподіл технологічних деформацій, як на рівні макроструктури, так і на рівні виробів.

Порівняльний аналіз показав, що введення дисперсної арматури суттєво впливає на процеси структуроутворення, що в свою чергу змінює характер розподілу несуцільностей і початкових деформацій на всіх рівнях структурних неоднорідностей матеріалу і виробів. Проведені досліді дали змогу обґрунтовано призначити вихідні складові матеріалу при вирішенні оптимізаційних задач з отримання раціональних складів для одержання декоративних матеріалів і виробів з поліпшеними експлуатаційними властивостями.

FEATURES OF STRUCTURAL FORMATION OF DISPERSED-REINFORCED DECORATIVE PRODUCTS

The paper considers the impact of discrete fiber on the processes of structure formation of decorative materials and products. The unique role of linear elements in the formation of discontinuities in the form of interface surfaces and cracks, as well as in the distribution of residual deformations, is shown. The role of discrete fiber in shaping the properties of materials, products and structures is revealed.

УДК 621.787; 620.178

ВПЛИВ РІЗНИХ МЕТОДІВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ НА ПІДВИЩЕННЯ АНТИФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧОРНИХ ТА КОЛЬОРОВИХ СПЛАВІВ

Волков О.О., к.т.н., Краєвська Ж.В., Ph.D., Субботін О.В.,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Васильченко О.В., к.т.н.,

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Тенденції сучасного розвитку матеріалів і методів оброблення включають підвищення вимог до довговічності та безвідмовності деталей машин та механізмів. Відтак зростає потреба у впровадженні методів об'ємного модифікування та модифікування поверхні, здатних ефективно підвищувати зносостійкість матеріалів з урахуванням очікуваних умов їх роботи. Серед таких умов можуть бути тертьові, ударні, вібраційні та інші види механічних навантажень, а також змінні температурні діапазони.

Дослідження присвячене визначенню антифрикційних властивостей сплавів на основі заліза та сплавів на основі алюмінію при випробуваннях на зношування після застосування різних підходів до модифікування їх поверхонь. Проте вплив методів модифікування на властивості сплавів різних груп, а саме: кольорових і чорних, не є однаковим. Так, наприклад, для низки кольорових металів і сплавів (вентильної групи) використання методу мікродугового оксидування (МДО) [1] дозволило отримати прогресивні результати щодо підвищення антифрикційності. В той же час для чорних сплавів використання цього методу не є доцільним у фізико-хімічному сенсі протікання даного процесу. Проте для таких сплавів доцільним є використання інших за своєю природою і кінетикою протікання методів, які передбачають деформаційний вплив за певних температурних умов [2]. Слід зазначити, що серед таких методів є ФДЗ (фрикційно-деформаційне зміцнення) та ДФДЗ (додаткове фрикційно-деформаційне зміцнення), застосування яких також дозволяє отримувати прогресивні результати щодо підвищення антифрикційних властивостей сталей і чавунів при поверхневому їх обробленні. Фрикційно-деформаційний вплив здатен модифікувати структуру і властивості матеріалу завдяки одночасній дії локального пластичного деформування в зоні обмеженого нагрівання, що виникає під час контактування поверхні з відповідним інструментом.

Тож розглянемо, як впливають ці два зовсім різних за кінетикою методи на підвищення антифрикційних властивостей кольорових та чорних сплавів відповідно. Дослідження якості поверхонь, результати макро-,

мікроскопічного аналізу, дюрOMETричних та інших видів досліджень, пояснюють взаємозв'язок між еволюцією мікроструктури та зміною властивостей у зоні фрикційно-деформаційного та фізико-хімічного впливу на поверхні. Антифрикційні характеристики поверхонь зразків після впливу зазначених методів досліджені із застосуванням машини тертя СМЦ-2 за схемою «диск–колодка». Також досліджено структуру та морфологію робочого шару поверхонь, які працюють в парах тертя з чавуном, сталлю та МДО-покриттям в умовах без змащування та зі змащуванням дизельною оливою та водою.

Для сталі 65Г після ДФДЗ поверхні в рамках даного дослідження були проведені випробування на зношування в парі тертя з чавуном в умовах без змащування, тобто в найбільш складних серед перерахованих. Дані випробування показали, що в результаті ДФДЗ поверхня набула підвищення зносостійкості і лінійний знос склав 0,02 мм порівняно з 0,055 мм у випадку без ДФДЗ. Тобто це в 2,75 рази менше, порівняно з лінійним зносом ідентичного загартованого зразка із сталі 65Г без ДФДЗ. Тож разом із збільшенням мікротвердості (до 16000–20000 МПа) і зносостійкості маємо значне підвищення антифрикційних властивостей, що є позитивним фактором для підвищення працездатності виробів після модифікування їх поверхонь в зазначений спосіб.

Окрім того, для покриття, що отриманого на сплаві Д16 визначено коефіцієнт тертя ковзання при навантаженні від 0,2 до 2 кН. Показана користь від наявної пористості робочого шару МДО-покриття, яка складає 5–10 % та сприяє утримувannya змащувальної речовини в зоні тертя. Вивчено фазовий склад, твердість покриттів. Встановлено, що МДО-покриття має кристалічну будову, фазовий склад включає високотемпературні модифікації оксиду алюмінію ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ та $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), мікротвердість складає 18000–20000 МПа. Встановлено, що коефіцієнт тертя ковзання пар: сірий чавун – МДО-покриття; сталь – МДО-покриття та МДО-покриття – МДО-покриття знижується до значення 0,01...0,013 в умовах змащування. Виявлено, що в парі МДО-покриття – МДО-покриття антифрикційні властивості проявляються в умовах змащування як оливою, так і водою. Низький коефіцієнт тертя для пари покриття-покриття у випадку змащування водою пояснюється високими гідрофільними властивостями оксидних контактуючих поверхонь, що дозволяє рекомендувати їх до використання у підшипниках ковзання (вкладишах) гідротурбін.

Таким чином, проаналізовано причини, які обумовлюють низький коефіцієнт тертя зразків з різних матеріалів. Досліджено та пояснено доцільність використання запропонованих методів інженерії поверхні для чорних та кольорових сплавів.

[1] О.В. Субботін, В.В. Білозеров, О.О. Волков, В.В. Субботіна, В.М. Шевцов. Фрикційні властивості МДО-покриттів на алюмінієвих сплавах. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. № 2. 2022. С. 59-63.

[2] O. Volkov, V. Subbotina, Z. Kraievskaya, A. Vasilchenko and O. Lyubchenko, Influence of carbon content on the strengthening characteristics of steels during AFSH. Solid state phenomena. 1163 (2025) 11–18.

INFLUENCE OF VARIOUS SURFACE MODIFICATION METHODS ON ENHANCING THE ANTI-FRICTION PROPERTIES OF FERROUS AND NON-FEATURED ALLOYS

The study is devoted to determining the antifriction properties of iron-based alloys and aluminum-based alloys in wear tests after applying different approaches to modifying their surfaces. The results of modifying the surface of 65G steel samples using the additional friction-strain hardening (AFSH) method and D16 aluminum alloy samples using the microarc oxidation (MAO) method are considered. It is shown that the combination of thermal and mechanical or physical and chemical effects initiates significant structural changes in the surface and near-surface layers of the material. Studies of surface quality, results of macro-, microscopic analysis, durometric and other types of studies explain the relationship between the evolution of the microstructure and the change in properties in the zone of friction-strain and physico-chemical effects on the surface.

УДК 621.787

СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ І ЗМІНА ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ, ЯК РЕЗУЛЬТАТ ДОДАТКОВОГО ФРИКЦІЙНО-ДЕФОРМАЦІЙНОГО ВПЛИВУ

Волков О.О., к.т.н., Субботіна В.В., д.т.н.,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Васильченко О.В., к.т.н.,

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Любченко О.В., д.м.н.,

Харківський національний медичний університет, м. Харків

В умовах постійного підвищення вимог до довговічності та безвідмовності машинобудівних деталей зростає потреба у впровадженні технологій, здатних ефективно підвищувати їхню зносостійкість. Це

особливо актуально для вузлів, що функціонують за умов інтенсивного тертя, значних механічних навантажень і змінних температур. Фрикційно-деформаційний вплив дає змогу цілеспрямовано модифікувати структуру й властивості матеріалу завдяки одночасній дії локального нагрівання та пластичної деформації в зоні контакту. Поєднання теплових і механічних чинників спричиняє глибоку структурну трансформацію приповерхневих шарів, що забезпечує підвищення твердості, втомної міцності та опору зношуванню.

Окремої уваги потребують сталі з різним вмістом вуглецю, оскільки характер їх зміцнення суттєво залежить від хімічного складу та вихідної структури. Відмінності в механізмах структуроутворення зумовлюють необхідність ґрунтовного аналізу їх поведінки за умов фрикційно-деформаційного навантаження, зокрема з визначенням внеску деформаційної складової в загальний ефект зміцнення.

Проблема деформаційного зміцнення матеріалів тривалий час залишається предметом наукових досліджень. Основні механізми зміцнення металів і сплавів можна узагальнити таким чином:

1. Дислокаційне зміцнення - зростання густини дислокацій у процесі пластичної деформації, що підвищує опір руху дефектів кристалічної ґратки та ускладнює подальшу деформацію.

2. Зернограничне зміцнення - подрібнення зерен, особливо ефективне при інтенсивній пластичній деформації, яка сприяє формуванню ультрадрібнозернистих і нанокристалічних структур.

3. Синергетична дія кількох механізмів за великих ступенів деформації, що забезпечує комплексне зростання міцності, мікротвердості та зносостійкості.

4. Фазові та структурні перетворення, а також твердорозчинне й дисперсійне зміцнення.

У разі поверхневого термдеформаційного оброблення (зокрема комбінованої термомеханічної обробки або фрикційно-деформаційного зміцнення) температурні градієнти та дифузійні процеси можуть ініціювати фазові перетворення, утворення карбідних фаз і формування мікро- та наноструктур. За надвисоких ступенів пластичної деформації можливе зменшення розміру зерен до наномасштабу (1–100 нм). У таких умовах класична залежність Холла-Петча може втрачати лінійний характер: при надмалих розмірах зерна зміцнення за рахунок меж зерен зменшується через зміну механізмів пластичної деформації - зокрема активацію ковзання по межах зерен або дифузійно-керованих процесів.

Аналіз результатів дослідження додаткового впливу фрикційно-деформаційного фактору оброблення поверхні на структурний стан і властивості сталей марок 20, 45, У7 і У12 під дією додаткового фрикційно-

деформаційного зміцнення показав, що отриманий додатково зміцнений поверхневий шар може складатися з мартенситу, який зазнав інтенсивної деформації, що й забезпечує підвищений рівень мікротвердості.

Встановлено, що коли вміст вуглецю перевищує 0,8 % у сталі формується більша кількість структури залишкового аустеніту, яка знижує рівень твердості, хоча й може частково зміцнюватися внаслідок подальшого деформування поверхні. Саме тому в сталі У12 спостерігається менша глибина зміцнення та нижча мікротвердість поверхневого «білого шару» після такого оброблення поверхні ніж у сталі У7, для якої деформаційний вплив на наявну мартенситну структуру є значно ефективнішим.

Одночасно з цим, ще однією важливою умовою є саме температура нагрівання в процесі фрикційно-деформаційного впливу. Необхідно, щоб така температура була нижчою за критичну, проте достатньою для набуття матеріалом стану, коли він здатен до наклепу без пошкоджень структури та супутніх процесів, які можуть призводити до руйнування матеріалу. За таких умов деформаційний вплив набуває найбільшої ефективності, оскільки мартенситне перетворення під час попередньо проведеного гартування відбулося найбільш повно.

Створивши необхідні умови для зміцнення поверхні у виробках із сталей, навіть коли вони вже зміцнені термічним шляхом, до максимально можливого в такий спосіб рівня, можна досягти їх ефективного додаткового зміцнення за рахунок деформаційного впливу в певному температурному діапазоні, з реалізацією ефекта Холла-Петча та субзеренно-дислокаційного зміцнення при комплексній дії оброблення матеріалу.

Виявлено, що додатковий вплив фрикційно-деформаційного фактору оброблення поверхні реалізується спільним вкладом від кожного із зазначених методів. Це підтверджується такими змінами у структурі та властивостях матеріалів дослідження, як здрібнення і фрагментування структури на зеренному та субзеренному рівнях, підвищення як мікротвердості так і рівня інших механічних характеристик у поверхневому шарі зразків тощо.

Запропоновано розширити можливості застосування додаткового фрикційно-деформаційного фактору оброблення поверхонь для додаткового зміцнення, наприклад, пар тертя, виробів інструментальної групи, та інших виробів, які потребують підвищеної твердості та зносостійкості поверхні.

[1] O. Volkov, V. Subbotina, Z. Kraievska, A. Vasilchenko and O. Lyubchenko, Influence of Carbon Content on the Strengthening Characteristics of Steels during AFSH. Solid state phenomena. 1163 (2024) 11–18.

[2] O.A. Volkov, Study of heat deformation influence in surface strain hardening of steel by thermofriction processing. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2 5(80) (2016) 38–44.

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS AND CHANGES IN THE PROPERTIES OF STEELS AS A RESULT OF ADDITIONAL FRICTION-DEFORMATION INFLUENCE

The article considers the modern view of the influence of the deformation aspect of processing on the structural state and properties of steels from the point of view of a combination of thermal and mechanical effects that cause significant structural transformations in the surface layers of the material. The main mechanisms of strengthening of materials with the participation of deformation effects are considered and their characteristics are given. Using durometric studies and using the results of metallographic analysis obtained earlier, the features of the relationship between the evolution of the microstructure and the change in properties in the field of influence of surface deformation are determined. Separate results of the influence of additional frictional-deformation surface processing are presented and the influence of the deformation component on the distribution of microhardness in the cross section of steel samples with different carbon contents is analyzed.

УДК 624.9

МОДАЛЬНИЙ АНАЛІЗ БАГАТОПОВЕРХОВОЇ БУДІВЛІ З УРАХУВАННЯМ ОДНОСТОРОННІХ ЗВ'ЯЗКІВ

Коврова В.О., аспірантка

ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро

Волкова В.Є., д.т.н., проф.

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро

При розрахунках будівель на сейсмічні впливи важливим є адекватне врахування нелінійної роботи конструкцій та контактної взаємодії елементів. Одним із способів здійснення цього є моделювання з введенням односторонніх зв'язків, які дозволяють враховувати можливість відриву фундаменту від основи або роботи елементів лише на стиск чи розтяг. Особливо актуальним це є для задач прямого динамічного аналізу та дослідження поведінки будівель при інтенсивних динамічних навантаженнях [1].

Згідно з вимогами ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво в сейсмічних районах України» при розрахунку будівлі на сейсмічні впливи необхідно враховувати динамічні характеристики, зокрема власні форми та частоти коливань [2]. Для складних конструктивних систем доцільним є застосування прямого динамічного методу із використанням акселерограм реальних або синтезованих землетрусів [3].

Метою роботи є дослідження впливу введення односторонніх зв'язків на динамічні характеристики багатоповерхової залізобетонної будівлі шляхом порівняння результатів модального аналізу вихідної розрахункової моделі та моделі з введеними односторонніми зв'язками.

Для здійснення аналізу використано розрахункову модель багатоповерхової залізобетонної каркасної будівлі, зображену на рис. 1 [4-6]. Просторова жорсткість забезпечується жорстким з'єднанням ригелів із колонами та двома ядрами жорсткості. Фундамент будівлі є плитним. Основні характеристики будівлі: розміри в плані – 18×58 м, висота поверху – 4,2 м, поверховість – 5 поверхів та 1 підвальний, район будівництва – м. Дніпро [4-6]. Для дослідження було створено дві розрахункові моделі у програмному комплексі SCAD. Перша модель є вихідною, а друга – з односторонніми зв'язками.

Односторонні зв'язки моделювались за допомогою скінченних елементів типу 352. Такі елементи дозволяють враховувати роботу зв'язку лише в одному напрямку та виключати його з роботи при зміні знаку зусилля. Використання односторонніх зв'язків дозволяє моделювати можливий відрив конструкції від основи та локальну втрату контакту між елементами системи [7, 8]. Це забезпечує більш реалістичне відображення роботи конструкції під час динамічних впливів.

У результаті розрахунків отримано власні значення та частоти коливань для перших десяти форм, за якими створено графіки для порівняння результатів, що відображені на рис. 2, 3. Порівняння результатів показало, що введення односторонніх зв'язків призводить до збільшення власних значень, суттєвого зниження частот власних коливань, зміни характеру форм коливань; зменшення загальної жорсткості системи.

Для першої форми коливань власне значення збільшилось на 42,5 %. При цьому спостерігається зменшення частоти майже на 30 %. Для другої форми коливань частота зменшилась на 20 %, а для третьої – на 14 %. Найбільше зниження спостерігається для четвертої форми коливань – близько 49 %. Для решти форм зниження частот перебуває у межах 30-45 %.

Згідно з отриманими результатами можна зробити висновок, що врахування односторонньої роботи зв'язків суттєво впливає на динамічну поведінку конструкції. Це пояснюється можливістю локального виключення

зв'язків із роботи при зміні характеру зусиль, що призводить до перерозподілу жорсткості системи.

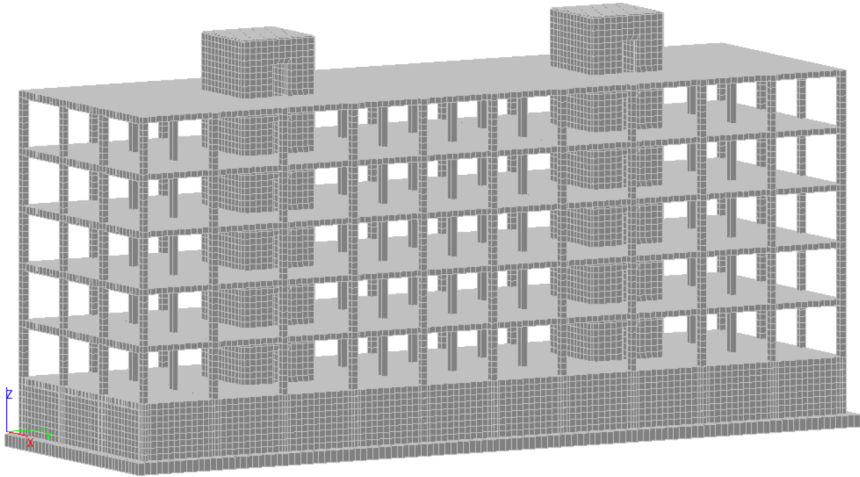


Рис. 1. Розрахункова схема [4-6]

Графіки залежностей власних значень і частот коливань підтверджують загальну тенденцію до зменшення жорсткості конструктивної системи при врахуванні односторонніх зв'язків. Зниження частот власних коливань свідчить про збільшення деформативності системи та може суттєво впливати на результати сейсмічного розрахунку.

Відповідно до результатів дослідження встановлено, що введення односторонніх зв'язків суттєво впливає на динамічні характеристики системи та призводить до зниження частот власних коливань. Найбільше зменшення частот спостерігається для четвертої форми коливань і досягає майже 50 %. Таким чином, використання односторонніх зв'язків дозволяє точніше враховувати контактну нелінійність, можливість втрати контакту між елементами конструкції та локальне виключення зв'язків із роботи. Розрахункові моделі без урахування контактної нелінійності можуть переоцінювати жорсткість конструктивної системи та не точно відобразити її динамічну поведінку.

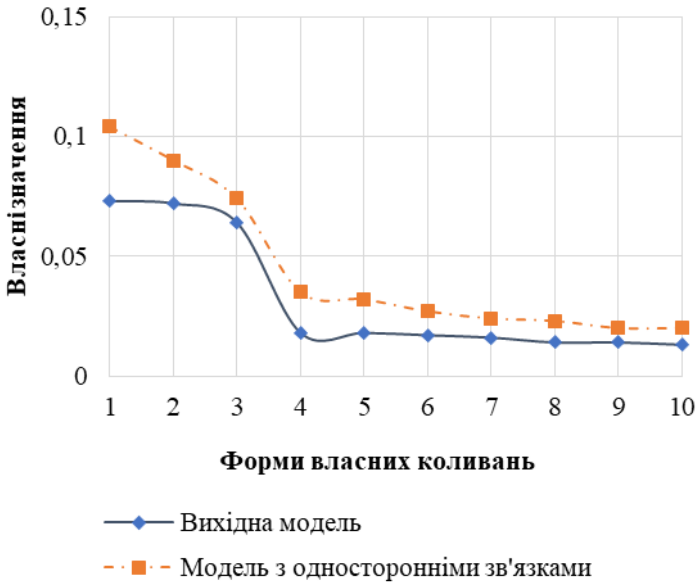


Рис. 2. Графік власних значень

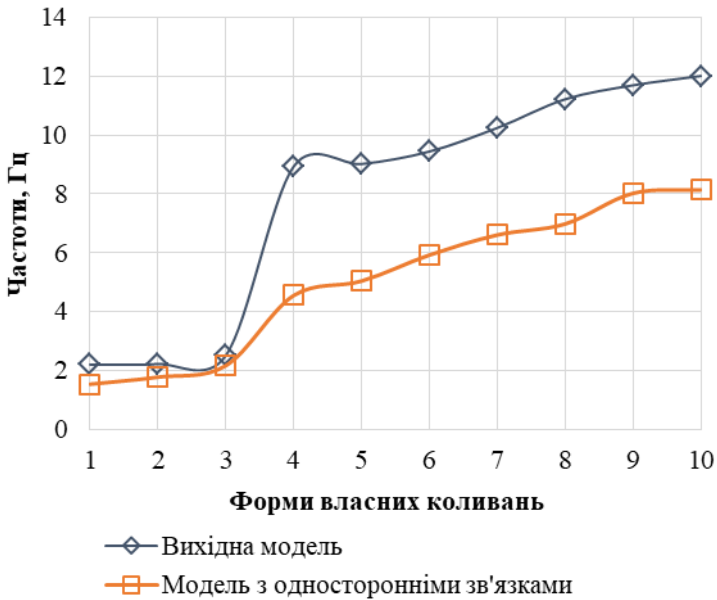


Рис. 3. Графік частот власних коливань

- [1]. Перельмутер А. В. Деякі особливості перевірки сейсмостійкості прямим динамічним розрахунком. Наука та будівництво. 2025. №43 (1). С. 33–40. URL: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2025-4>.
- [2]. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. На заміну ДБН В.1.1-12:2006 ; чинний від 2014-10-01. Вид. офіц. Київ, 2014. 118 с.
- [3]. Баженов В.А, Перельмутер А.В, Шишов О. В. Будівельна механіка. Комп'ютерні технології : підручник. Київ : Каравела, 2009. 696 с.
- [4]. Kovrova, V., Volkova, V., Pakrastins, L. (2024). Modal Analysis of a Multi-storey Frame Building with Consideration of the Soil Base. In: Barros, J.A.O., Kaklauskas, G., Zavadskas, E.K. (eds) Modern Building Materials, Structures and Techniques. MBMST 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 392. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44603-0_69
- [5]. Kovrova V., Volkova V. Analysis of the influence of different soil types on the natural frequencies of multi-storey reinforced concrete buildings. Strength of Materials and Theory of Structures. 2023. No. 111. P. 172–177. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.172-177>.
- [6] Volkova V., Kovrova V. The impact of changing the type of cross-section of columns of frame buildings. Modern construction and architecture. 2024. No. 10. P. 17–26. URL: <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-10-17-26>.
- [7]. Карпіловський В. С., Криксунов Е. З., Маляренко А. А., Перельмутер А. В., Перельмутер М. А., Фіалко С. Ю. SCAD Office V.23. Система SCAD++ / SCAD Soft. Київ, 2024. 544 с.
- [8]. Unilateral Constraints. ScadSoft. https://scadsoft.com/help/SCAD/en/SCAD1033/one-sided_connections.htm.

MODAL ANALYSIS OF A MULTISTORY BUILDING WITH UNILATERAL CONNECTIONS

This paper presents a comparative modal analysis of a multi-story reinforced concrete building for the initial design scheme and a model that takes into account unilateral connections. The influence of adding unilateral elastic elements on the natural frequencies and vibration modes of the structure is investigated. The analysis revealed a significant reduction in natural frequencies and a change in the system's dynamic characteristics, indicating a decrease in the spatial stiffness of the model when accounting for the possibility of unilateral connection behavior.

УДК 539.3

ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ ПОБЛИЗУ ЕЛІПТИЧНОГО ОТВОРУ В ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ ПЛАСТИНАХ З РІЗНИХ ТИПІВ МАТЕРІАЛІВ

Гарт Е.Л., д-р фіз.-мат. наук, проф.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро

Терьохін Б.І., PhD

Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, м. Дніпро

Наявність отворів, зокрема еліптичної форми, у тонкостінних елементах конструкцій призводить до локальної концентрації напружень [1], що є однією з основних причин передчасного руйнування та зниження експлуатаційної довговічності конструкції. Традиційні методи підкріплення країв отворів часто не забезпечують бажаного ефекту щодо зниження концентрації напружень. Використання функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ), властивості яких змінюються поступово завдяки варіюванню мікроструктури та/або складу, дає змогу ефективно впливати на величину коефіцієнта концентрації напружень (ККН) [2, 3]. У зв'язку зі зростанням ролі ФГМ в різних галузях техніки, зокрема ракетно-космічній, нафтогазовій, енергетичній та будівельній сферах, актуальним є дослідження неоднорідних елементів конструкцій з метою підвищення їхньої міцності та експлуатаційної довговічності.

У роботі виконано комп'ютерне моделювання та скінченноелементний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) пружних тонких ФГМ-пластин з еліптичним отвором. Досліджено вплив напрямку та параметрів неоднорідності матеріалу на НДС пластин. Розглянуто три варіанти зміни модуля пружності ФГМ-пластини: горизонтальний, радіальний та еліптично-радіальний напрямки неоднорідності.

Показано, що застосування ФГМ із запропонованим кусково-лінійним законом зміни модуля пружності дає змогу суттєво знизити концентрацію напружень поблизу еліптичного отвору в тонких пластинах. Такий ефект досягається завдяки особливостям закону неоднорідності, який забезпечує перерозподіл напружень від краю отвору в напрямку більш «жорсткої» області ФГМ-пластини (рис. 1–3), де коефіцієнт відносної жорсткості $k \geq 2$. Оскільки у запропонованому варіанті закону неоднорідності ФГМ-область має більшу жорсткість порівняно з основним матеріалом пластини, це також сприяє

істотному зменшенню максимальних деформацій – більш ніж у 3 рази порівняно з однорідною пластинною.

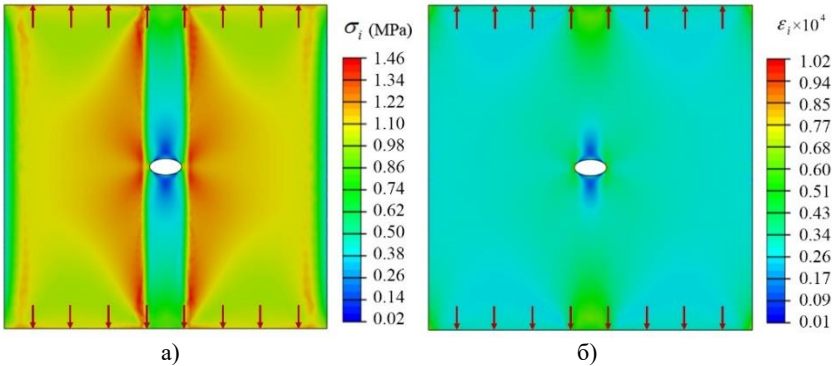


Рис. 1. Розподіл інтенсивності напружень σ_i (а) і деформацій ε_i (б) в ФГМ-пластині з еліптичним отвором та горизонтальною неоднорідністю

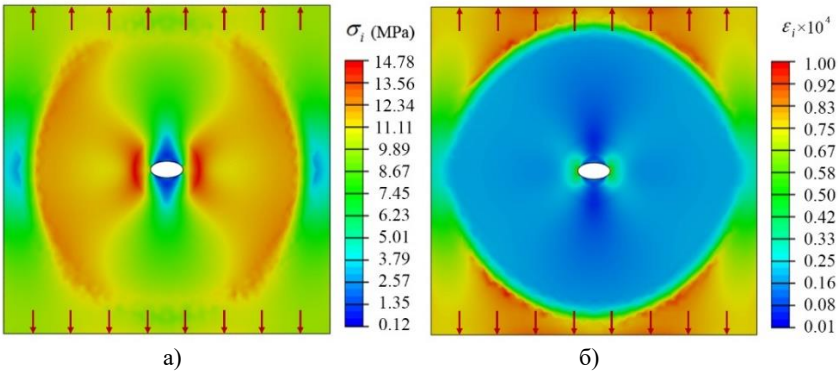


Рис. 2. Розподіл інтенсивності напружень σ_i (а) і деформацій ε_i (б) в ФГМ-пластині з еліптичним отвором та радіальною неоднорідністю

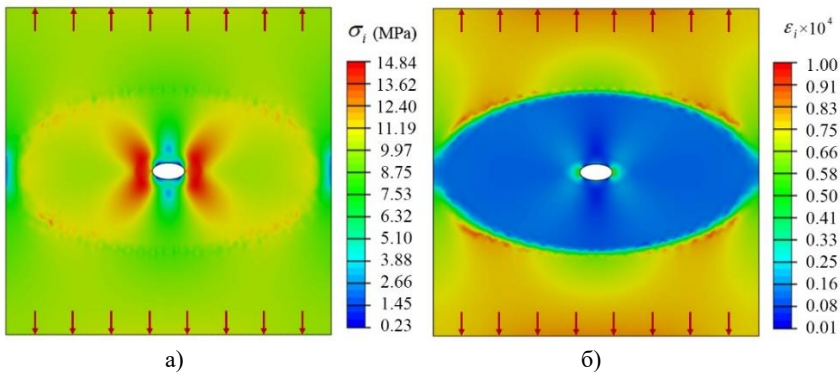


Рис. 3. Розподіл інтенсивності напружень σ_i (а) і деформацій ϵ_i (б)

в ФГМ-пластині з еліптичним отвором та еліптично-радіальною неоднорідністю

Результати числового дослідження впливу механічних і геометричних характеристик ФГМ-пластини на концентрацію параметрів НДС поблизу еліптичного отвору в тонких пластинках показали, що застосування запропонованого кусково-лінійного закону зміни механічних властивостей матеріалу дає змогу суттєво зменшити величину ККН (більш ніж у 3 рази), а також відповідну інтенсивність деформацій поблизу отвору для всіх розглянутих варіантів напрямків неоднорідності. Встановлено, що для кожного варіанта зміни модуля пружності існують власні раціональні параметри неоднорідності.

Одержані числові результати для ФГМ-пластин та їх порівняння з розв'язками для однорідної пластини можуть бути корисними під час розроблення нових матеріалів із заданими характеристиками. Визначені раціональні параметри неоднорідності та отримані числові розв'язки можуть бути безпосередньо використані під час проектування й оптимізації тонкостінних конструкцій із концентраторами напружень з метою підвищення їхньої несучої здатності та довговічності.

Перспективним напрямом подальших досліджень є аналіз впливу ФГМ у тонкостінних пластинчато-оболонкових елементах конструкцій з отворами різної конфігурації та пошук раціональних параметрів неоднорідності, спрямованих на зниження концентрації параметрів НДС.

[1]. W.D. Pilkey, D.F. Pilkey, Z. Bi. Peterson's Stress Concentration Factors, 4th Edition. – New York: Wiley, 2020. – 640 p.

[2]. V.S. Hudramovich, E.L. Hart, B.I. Terokhin. Stress concentration around a circular hole in thin plates and cylindrical shells with a radially inhomogeneous inclusion // Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods. Advanced Structured Materials:

Collected Work. – Cham: Springer, 2024. – Vol. 204. – Chapter 18. – P. 249–264.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-54063-9_18

[3]. E.L. Hart, B.I. Terokhin. Methods for reducing stress concentration around holes in thin plates and cylindrical shells with annular radially inhomogeneous inclusions // International Applied Mechanics. – 2025. – Vol. 61, No. 3. – P. 359–368. <https://doi.org/10.1007/s10778-025-01359-0>

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF STRESS CONCENTRATION NEAR AN ELLIPTICAL HOLE IN FUNCTIONALLY GRADED PLATES WITH DIFFERENT MATERIAL TYPES

Computer simulation and finite element analysis of stress concentration near an elliptical hole in thin plates made of functionally graded material (FGM) under uniaxial tension were carried out. The effects of the direction and variation law of the plate material heterogeneity on the value of the stress concentration factor was analyzed. Rational parameters of the FGM plate heterogeneity were found for the considered problems, which allow reducing the stress concentration factor to ~70%. At the same time, a mechanical effect is observed: the use of FGM for a plate with the proposed law of change of the elastic modulus leads to a decrease in the intensity of both stresses and strains near the hole.

УДК 621.924.9

ОЦІНКА ЗНОШУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ДРОБУ ПРИ ДРОБОСТРУМІННІ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ

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

Під стійкістю до зношування (працездатністю) технічного дроби слід розуміти кількісну оцінку за одним або декількома показниками ступеня відповідності дроби своєму призначенню при виконанні технологічної операції дробоструминного очищення металевих виробів від окисних відкладень і механічних включень. В зв'язку з цим слід відмітити, що дробоструминне очищення є одним з найбільш поширених способів струминно-абразивної обробки [1-2]. Тому при оцінці стійкості технічного дроби зношуванню спиратимемося на відомі критерії оцінки працездатності абразивних інструментів [3-4]. Такими критеріями є наступні: питома продуктивність $p = Q_m / Q_a$; питомий знос абразиву $q = Q_a / Q_m$; питома

продуктивність на одиницю нормальної сили $k = Q_m / F_n$ та інші. Ці критерії пов'язані безпосередньо з об'ємом зношеного абразиву Q_a (масою M_a), та знятого металу Q_m (M_m) і нормальною складовою сили дії абразиву на оброблювану поверхню F_n . Практикою встановлено, що інтенсивність зношування технічного дробу U_{zn} пропорційна масі дробу M_0 , завантаженого в систему живлення дробоструминного апарату. Інтенсивність зношування дробу визначають таким чином. Нехай у момент часу t маса дробу складала M , а у момент $t + \Delta t$ – маса $M - \Delta M$. Тобто за час Δt маса дробу зменшилася на величину ΔM . Відношення $\Delta M / \Delta t$ є середньою інтенсивністю зношування. При $\Delta t \rightarrow 0$ межа цього відношення $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta M / \Delta t = dM / dt = U_{zn}$ і є інтенсивністю зношування дробу у момент часу t .

Основним критерієм працездатності абразивного інструменту вважають показник $q = 1/p$, який встановлює співвідношення між об'ємом витраченого абразиву Q_a і об'ємом видаленого металу Q_m . Для дробоструминного очищення цікавим буде і третій показник k , оскільки нормальна сила F_n пропорційна швидкості атакуючої дробинки v і куту атаки α , які є технологічними режимами дробоструминної обробки.

Оцінка працездатності дробу за першим критерієм питомою продуктивністю процесу ($p = Q_m / Q_a$) нами розкритий в [5]. Тут розглянемо наступні критерії стосовно дробоструминного очищення сталевих виробів й пов'язані з ними деякі особливості динамічної взаємодії дробинки з атакваною поверхнею.

Характерним показником ефективності дробоструминного очищення являється питомий знос абразивного матеріалу q , який може бути виражений у вигляді наступного відношення

$$q = U_{zn} t / M_m = M_{op} / M_m, \quad (1)$$

де M_{op} – втрачена зношуванням маса технічного дробу на очищення за деякий час t ефективної роботи дробоструминного сопла, наприклад, за час стійкості дробу T ; M_m – маса видаленого металу з поверхні оброблюваного виробу за той же час $t = T$.

За наведеним відношенням можна судити, яка маса технічного дробу витрачається на видалення з поверхні оброблюваного виробу одиниці маси металу. Чим менше відношення q , тим ефективніше дробоструминне очищення.

Реалізація виразу (1) приводить до такої кінцевої формули визначення питомого зношування технічного дробу

$$q = 2B_{op} (1 - \varphi^3) / Q_f \delta \rho_m (1 + \varphi^3) n, \quad (2)$$

де B_{op} – подача дробу через дробоструминне сопло за одиницю часу, кг; $\varphi = d_{n-1}/d_n$ – коефіцієнт, визначений як відношення початкового діаметра дробинки d_n до нижче наступного діаметра d_{n-1} параметричного ряду за час ефективної роботи $t = T$; Q_f – поверхнева продуктивність дробоструминного сопла; δ – величина (товщина) знімаемого припуску \sim параметру шорсткості обробленої поверхні R_z [6]; ρ_m – густина оброблюваного металу; n – кількість циклів використання дробу.

Так, наприклад, дробоструминне очищення зварних корпусів ємнісних апаратів, виготовлених з листової низьковуглецевої сталі 10, за наступних показників технологічного комплексу: дробоструминний апарат нагнітальної дії з ємністю камери 200 л; абсолютний тиск стисненого повітря в камері апарату $p_{acc} = 7$ бар; технічний дріб – сталевий гострокутний згідно з ДСТУ 3184-95, номер 1,0; діаметр дробинки, доведеної до критичного стану, $d_{n-1} = 0,8$ мм, після $n = 400$ циклів; масова подача дробу через дробоструминне сопло $B_{op} = 25$ кг/хв; товщина припуску $\delta \approx 0,1$ мм; поверхнева продуктивність дробоструминного сопла $Q_f = 0,1$ м²/хв характеризується, при $\varphi^3 = (d_{n-1}/d_n)^3 = 0,8^3 = 0,512$ і густині оброблюваного металу $\rho_m = 7800$ кг/м³, параметром $q = 0,52$. Такий показник свідчить про те, що на видалення маси металу 1 кг витрачається $\sim 0,52$ кг технічного дробу.

Питоме зношування технічного дробу характеризує економічність і ефективність дробоструминного очищення, дає можливість розрахувати технологічну собівартість дробоструминного очищення, визначити технічну характеристику пристрою для видалення металевого пилу з робочої зони дробоструминного очищення і звернути увагу технологів на встановлення раціональних технологічних режимів дробоструминня.

[1]. Basdeki M., Apostolopoulos C. The Effect of Shot Blasting Process on Mechanical Properties and Anti-Corrosive Behavior of Steel Reinforcement. *Metals*. 2022. 12(2) : 275. <https://doi.org/10.3390/met12020275>

[2]. Фізико-математична теорія процесів обробки матеріалів та технології машинобудування: [монографія]; в 10-ти т. Т. 4: Теорія абразивної та алмазно-абразивної обробки матеріалів / За заг. ред. Ф. В. Новікова, О. В. Якімова. Одеса : ОНПУ, 2002. 802 с.

- [3]. Горик О. В., Брикун О. М., Черняк Р. Є. Оцінка інтенсивності абразивного руйнування металевих поверхонь дією дробоструминного факелу. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин* : загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. Кропивницький : ЦНТУ, 2017. Вип. 47, ч. 1. С. 72–78.
- [4]. Lipiński D., Kasalak W., Tomkowski R. Methodology of evaluation of abrasive tool wear with the use of laser scanning microscopy. *Scanning*. 2014, Vol. 36. P. 53–63. <https://doi.org/10.1002/sca.21088>
- [5]. Горик О. В., Брикун О. М., Черняк Р. Є. Оцінка працездатності технічного дробу при дробоструминному очищенні металевих поверхонь. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь* : зб. тез III Всеукр. наук.-практ. конф. Житомир : ЖТАК, 2017. С. 64–67.
- [6]. Горик О. В., Ковальчук С. Б., Брикун О. М., Черняк Р. Є. Прогнозування шорсткості металевих поверхонь деталей машин при дробеструменевому очищенні. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. Вип. 63. С. 38–43.

ASSESSMENT OF WEAR OF TECHNICAL SHOT DURING SHOT BLASTING OF METAL PRODUCTS

The issue of assessing the wear of technical shot used in the process of shot blasting of metal products is considered. It is noted that for the analysis of shot efficiency, it is advisable to use known criteria for assessing the performance of abrasive tools, in particular, specific productivity and specific abrasive wear. Particular attention is paid to the specific wear rate of shot, which determines the ratio between the mass of abrasive consumed by wear and the mass of metal removed. The influence of the main technological parameters of shot blasting on the specific wear rate and the possibility of using this indicator to evaluate the efficiency of the process and determine rational cleaning modes are shown.

УДК 621.039.7:666.9

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄМНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ГЕОЦЕМЕНТНИХ КОМПАУНДІВ ІЗ ІМІТАТОМ БОРВМІСНИХ РІДКИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

Гузій С.Г., к.т.н., с.н.с.

Державна установа “Інститут геохімії навколишнього середовища національної академії наук України”, м. Київ

Курська Т.М., к.т.н., доц.

Національний університет “Одеська політехніка”, м. Одеса

Дослідження об'ємних деформацій цементних компаундів із борвмісними рідкими радіоактивними відходами (РРВ), є критично важливим етапом для забезпечення довгострокової безпеки при захороненні радіоактивних матеріалів [1-3]. Важливо відмітити деякі аспекти, що впливають на об'ємні деформації, а саме:

- склад РРВ – включення концентрованих сольових розчинів (імітатів) впливає на кристалізацію. При охолодженні імітатів, які містять мета- чи тетраборати натрію, виникають явища переохолодження та спонтанної кристалізації, що спричиняють внутрішні напруження та об'ємні зміни;
- водотвердне чи водоцементне відношення (В/Т, В/Ц) чим вище, тим збільшуються показники капілярної пористості, зменшується щільність, підвищується водопоглинання, що в сумі призводить до збільшення усадки та деформативності;
- використання добавок (шлаків, цеоліту) у вигляді дисперсних наповнювачів сприяє зміні розподілу об'ємних деформацій;
- пластичні та пружні деформації – збільшення концентрації наповнювачів призводить до зміни жорсткості компаундів завдяки зростанню частки пластичних деформацій;
- тріщиноутворення – нерівномірна кристалізація солей боратів натрію в структурі цементного каменю при коливання температур спричиняє появу мікротріщин, що впливає на герметичність компаунду.

Враховуючи вище наведені аспекти, для зменшення шкідливих деформацій, а також визначення оптимального об'єму заповнення металевих контейнерів кондиційованими радіоактивними відходами, рекомендується використовувати геополімери/геоцементи на основі метакаоліну, шлаків, зол замість поргланццементу, що дозволить знизити об'ємні деформації та підвищити міцність з часом у 1,5 – 2 рази [4, 5].

У представленому дослідженні наведені дані щодо впливу імітату на деформативні властивості компаундів на геоцементі морденітового типу. У якості затверджувача використали мелений доменний шлак. Як структуроутворюючу добавку – мелений цеоліт. Як борвмісний імітат, аналог РРВ Запорізької АЕС [5], % мас.: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 36,1; NaNO_3 – 7,8; NaOH – 13,0; KOH – 2,1; NaCl – 0,3; Fe_2O_3 – 0,3; H_2O – 39,8. До складу імітату також входили $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, CsNO_3 та ПАВ, які в сумі складали 0,5 %. Густина імітату становила $1,54 \text{ г/см}^3$, загальний вміст солей – 60,2 %.

Оптимізацію складів компаундів на основі композиційного цементу V типу морденітового складу проводили з використанням трифакторного симплексного центрального плану експерименту в математичному середовищі STATISTICA 12 з реалізацією спеціальної кубічної моделі, яка враховує не лінійність впливу факторів на властивості вихідних параметрів. У якості факторів варіювання обрано вміст: затверджувача та цеоліту від 5 до 15% (фактори X1 і X2), вміст імітату від 10 до 50% (фактор X3).

Змішування складових компаундів – геоцементу, шлаку та цеоліту здійснювали з підігрітим до 60°C імітатом у співвідношеннях, наведених в табл. 1.

Таблиця 1

Склади компаундів на основі геоцементу морденітового типу
 $(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{SiO}_2 \cdot 15\text{H}_2\text{O})$

Точки плану	Компонентний склад, %			
	Геоцемент	Затверджувач	Цеоліт	Імітат
1	70	5	15	10
2	60,01	8,33	8,33	23,33
3	70	15	5	10
4	70	10	10	10
5	40	5	5	50
6	55	10	5	30
7	55	5	10	30

Показники об'ємних деформацій усадки/розширення визначали на кубиках розмірами $3 \times 3 \times 3$ см після їх тверднення при температурах 100°C протягом 4 год. (точка відліку) по прийнятим в Україні методикам.

Зміна значень об'ємних деформацій усадки/розширення в залежності від часу тверднення за нормальних умов наведена в табл. 2 і на рис.2.

Таблиця 2

Об'ємні деформації усадки/розширення компаундів

Точки плану	Час тверднення, діб						
	0	1	2	7	14	21	28
1	0	0	-0,65	0,343	3,129	-0,965	0
2	0	1,66	0,014	0,984	0,967	0,984	0,645
3	0	-1,29	0	0	-1,29	-0,983	-0,983
4	0	-1,6	-2,25	-1,297	-2,25	-2,595	-1,946
5	0	-0,032	0,32	0	-0,65	-0,357	0
6	0	0,299	-0,62	0,065	-0,58	-0,942	-1,583
7	0	1,235	1,36	1,002	-0,29	0,032	0,646

Як видно з даних табл. 2 і рис., всім складам компаундів притаманна зміна об'ємних деформацій усадки/розширення на протязі терміну твердіння внаслідок процесів і структуроутворення, і кристалізації складових імітату.

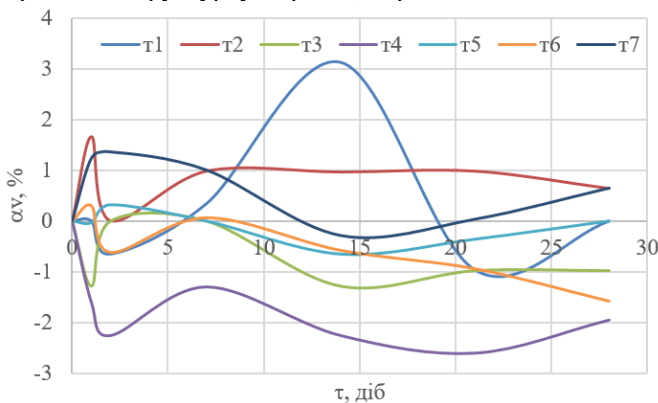


Рис. 2. Зміни об'ємної усадки/розширення компаундів в залежності від строків твердіння

Стабілізація значень об'ємних деформацій усадки спостерігається після 7 доби та 28 доби тверднення і характерна для складів компаундів – t3, t4 і t5, що містять в своєму складі мінімальну та максимальну кількість імітату – 10 і 50%. Для компаунду складу t2, що містить 23,3% імітату, характерна стабільність об'ємного розширення на протязі всього проміжку часу тверднення, а для складів компаундів t6 і t7, що містять 30% імітату, характерний прояв стабільності об'ємної деформації усадки.

З практичної точки зору чим більше борвмісного РРВ буде кондиційовано, тим менше буде задіяно металевих контейнерів із

врахуванням об'єму їх наповнення компаундом. Оптимально, на наш погляд, є кондиціонування борвмісного імітату в кількості від 20 до 30%.

1. Свидерский В.А., Глуховский В.В., Глуховский И. В., Дашкова Т.С. Технологии отверждения жидких радиоактивных отходов. Ядерна та радіаційна безпека, 2019, 1(18), С. 68-74.

2. Гузій, С.Г. Особливості кондиціонування упарених борвмісних радіоактивних відходів алюмосилікатними матриями. Збірник наукових праць XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи», 09 – 12 грудня, Полтава: Полтавська політехніка, 2025, с. 238-240.

3. Гузій С.Г., Присяжна О.В., Гузій О.І. (2024). Еколого-феноменологічні та математичні підходи по кондиціонуванню упарених радіоактивних відходів. Міжнародна науково-технічна конференція “Моделювання та оптимізація будівельних композитів” (Семінар МОБК), 05-06 грудня, Одеса, 2024, с. 7-10.

4. Розко А.М., Федоренко Ю.Г., Ольховик Ю.О., Павлишин Г.П. Межа міцності на стиск компаундів, отриманих при цементуванні високосольових борвмісуючих РРВ геополімерними зв'язуючими. Геохімія техногенезу, 2020, 2, с. 96-101.

5. Rozko, A., Fedorenko, Y. & Guzii, S. Conditioning of boron-containing LRW with composite binders. Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering, 2025, 1(64), pp. 130–135.

STUDY OF VOLUMETRIC DEFORMATIONS IN GEOCEMENT COMPOUNDS CONTAINING A SIMULANT OF BORON-CONTAINING LIQUID RADIOACTIVE WASTE

This article presents the results of research into the volumetric shrinkage/expansion deformations of geocement compounds containing simulated boron-containing liquid radioactive waste. We noted that all compound compositions exhibit changes in volumetric shrinkage/expansion deformations during the curing period due to processes of structure formation and crystallisation of the simulant components. The volumetric shrinkage deformation values stabilize after 7 and 28 days of curing. This is characteristic of compound formulations T3, T4 and T5, which contain the minimum and maximum amounts of filler – 10% and 50% respectively. Compound formulation T2, containing 23.3% filler, is characterized by stable volumetric expansion throughout the entire curing period. Compound formulations T6 and T7, containing 30% filler, are characterized by stable volumetric shrinkage. From a practical point of view, the more boron-containing PPV is conditioned, the fewer metal containers will be required, taking into account the volume of the compound they hold. In our view, the optimal approach is to condition the boron-containing filler in quantities ranging from 20 to 30%.

УДК 539.3

ДЕФОРМУВАННЯ ЛОКАЛЬНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ ДОРІГ ТА МОСТІВ НА ЖОРСТКІЙ ОСНОВІ

Гуртовий О.Г., к.т.н., доц., Тинчук С.О., к.т.н., доц.

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

Розрахунки міцності та деформативності різного роду однорідних та неоднорідних композитних, особливо багатошарових, покриттів зводяться до оцінки їх напружено-деформованого стану (НДС) як плит, що контактують із основою. Це стосується розрахунку дорожнього багатошарового одягу на достатньо жорстких мостових, тунельних та інших конструкціях транспортних споруд, захисних багатошарових покриттів плоских елементів конструкцій та деталей, функціональних покриттів робочих поверхонь різного обладнання, зокрема емалевих покриттів корпусів хімічних апаратів тощо. Тому достовірне визначення НДС багатошарових плит на жорстких основах при дії стаціонарного поперечного навантаження, є актуальною і багатофункціональною задачею.

Об'єднання матеріалів з ізотропними та трансверсально-ізотропними фізичними характеристиками в багатошаровий пакет дозволяє створювати багатофункціональні конструкції. НДС таких конструкцій, зважаючи на їх структурну неоднорідність та відносно низьку поперечну жорсткість окремих шарів, суттєво пов'язаний з впливом деформацій поперечного зсуву та деформацій поперечного обтиснення. Тому актуальною є задача уточненого моделювання НДС плит, яка б враховувала ці види деформацій. Вимоги до точності наближеного моделювання залежать від призначення конструкції та багатьох інших факторів. Необхідною є також і оцінка точності НДС, отриманого за уточненою моделлю. Потрібно відмітити, що застосування класичної теорії пластин чи уточнених поперечно-зсувних моделей призводить до тривіально-нульового розв'язку для НДС поперечно навантажених плит на жорсткій основі. Відомі уточнені моделі НДС [1, 2], що враховують поперечні зсуви та поперечне обтиснення, зорієнтовані переважно на описання згинового НДС, тоді як у плитах на жорсткій основі переважає беззгинова складова НДС. Отже, потрібна розробка уточненої моделі, яка б з високою точністю описувала беззгинову складову НДС плити на жорсткій основі. В роботі [3] запропоновано гіпотези та побудована спеціальна модель беззгинового деформування однорідної та шаруватої плити, яка в поєднанні з моделлю згинового деформування дає результати, що близькі до точного

тривимірному розв’язку. В роботах [4, 5] розглянуті структурно-континуальні моделі НДС поперечно навантажених плит, в яких ідея ітераційного моделювання [3], застосована для плит на жорсткій основі.

Метою даної роботи є оцінка точності та доцільності підходів [3-5] до моделювання НДС плит на жорсткій основі в залежності від фізико-геометричних характеристик плит.

У лінійно-пружній постановці розглядається деформування прямокутної багатошарової плити, яка опирається на жорстку основу. Шари плити – ізотропні та трансверсально-ізотропні, довільної, але сталої товщини. Замість реальної конструкції багатошарової плити (рис. 1а) пропонується розглядати розрахункову схему плити, яка утворена симетричною добудовою відносно поверхні контакту даної плити з основою. Плита буде у цьому випадку двосторонньо симетрично навантаженою відносно серединної поверхні плити, а товщина плити збільшиться вдвоє $H = 2b_n$ (рис. 1б). При цьому, контакт плити з основою відповідає умовам проковзування без тертя (рис. 1б). Жорсткий контакт плити з основою пропонується моделювати введенням додаткової абсолютно жорсткою тонкого прошарку h_0 (рис. 1в). Між шарами плити виконуються умови жорсткого контакту без проковзування, проте вводячи тонкі прошарки малої відносної жорсткості можна без змін у постановці задачі розглядати і інші умови міжшарового контакту.

Запропонований підхід дозволяє оптимізувати розглянуту в [4] уточнену модель НДС плити, яка складалася з двох якісно відмінних НДС – згинового і беззгинового. Згинова складова НДС зникає, оскільки НДС в симетричній за структурою плиті при двосторонньому симетричному навантаженні повністю описується беззгиновим НДС. Як наслідок, кількість невідомих функцій і, відповідно, порядок диференціювання розрахункової системи рівнянь в задачі істотно зменшується.

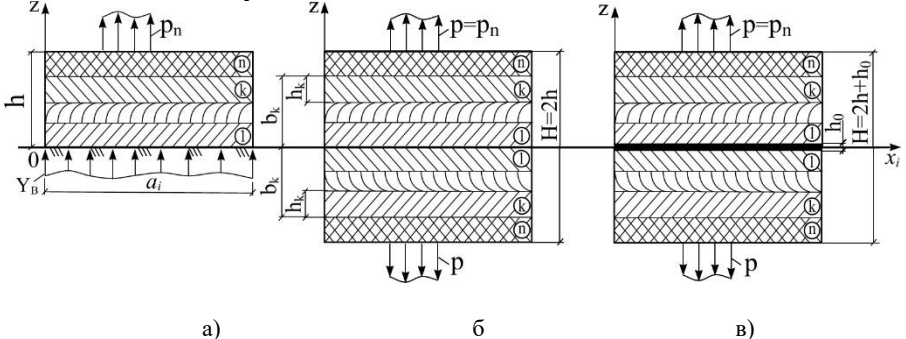


Рис.1. Варіанти оптимізації розрахункової схеми плити

В континуальній моделі [5] компоненти вектору нормальних $u_3^{(k)}$ та тангенціальних $u_i^{(k)}$ зміщень до координатної поверхні $x_1 x_2$ (рис. 1) представлені сумами добутків гіпотетично заданих степеневих функцій $\psi_t^{(k)}$, $\psi_{ir}^{(k)}$ поперечної координати z та шуканих функцій γ_t , β_{ir} і v_i координатної поверхні $x_1 x_2$:

$$u_3^{(k)} = \psi_{3t,3}^{(k)}(z)\gamma_t + \psi_{33,3}^{(k)}(z)p; \quad t = \overline{1, 2}; \quad i = \overline{1, 2};$$

$$u_i^{(k)} = v_i - \psi_{3t}^{(k)}(z)\gamma_{t,i} - \psi_{33}^{(k)}(z)p_i - \psi_{ir}^{(k)}(z)\beta_{ir}; \quad r = \overline{1, 4}, \quad (1)$$

де дві функції γ_t моделюють вплив поперечного обтиснення, а вісім функцій β_{ir} – вплив поперечного зсуву в четвертому наближенні по кожній змінній x_i , p – функція заданого навантаження. Тут і надалі диференціювання по x_α позначено нижніми індексами після коми, а також виконується підсумовування за нижніми індексами, що повторюються.

Для обґрунтування області застосування запропонованих моделей в залежності від фізичних параметрів досліджується вплив співвідношень пружних характеристик плити на точність моделей.

Аналізувались розв'язки для квадратної плити на жорсткій основі з крайовими умовами Нав'є під дією синусоїдального навантаження при ковзкому контакті (рис. 2). Матеріал плити трансверсально-ізотропний з $\nu = 0,3$; $\nu'' = 0,1$; $\nu''/E = \nu'/E'$; $a = 3h$ ($a = 1,5H$). Модулі пружності та зсуву в площині ізотропії E, G , а в перпендикулярному напрямку – E', G' .

Наближені розв'язки порівнювались з тривимірними розв'язками (T). Показано, що в суттєво товстих квадратних плитах, наприклад з $a/H = 1,25$, при зростанні G/G' необхідно збільшувати кількість функцій поперечного зсуву: при $G/G' < 100$ необхідно дві функції зсуву $S_{ri} = 2$ у кожному з ортогональних напрямків x_i ; при $100 \leq G/G' \leq 500$ – $S_{ri} = 3 \div 4$. При зростанні співвідношення E/E' необхідне збільшення кількості функцій поперечного обтиснення C_t : при $E/E' \leq 10$ достатньо використання одної функції $C_t = 1$, при $10 \leq E/E' \leq 1000$ потрібно дві функції обтиснення $C_t = 2$. У плиті з співвідношенням $a/H = 1,5$ необхідна така ж сама кількість невідомих функцій, тоді як в плиті з $a/H = 2,5$ є можливість зменшення кількості невідомих функцій. Відмітимо, що похибки для напруг σ_{11} більші, ніж для зміщень u_α .

- [1]. Пискунов В.Г. Об одном варианте неклассической теории многослойных пологих оболочек и пластин. Прикладная механика. 1979. Т. 15, № 11. С.76–81.
- [2]. Рассказов А.О. К теории многослойных ортотропных пологих оболочек / А.О. Рассказов // Прикладная механика. 1976. Т. 12, № 11. С. 50 – 56.
- [3]. Гуртовий А.Г. Высокоточное моделирование деформирования слоистых структур / А.Г. Гуртовий // Механика композитных материалов. 1999. Т. 35, № 1. С. 13–28.
- [4]. Гуртовий О.Г. Задача поперечного деформування трансверсально-ізотропної плити при контакті з абсолютно жорсткою основою / О.Г. Гуртовий, С.О. Тинчук // 36. наук. праць Вісник УДУВГП. Рівне УДУВГП. 2004. Випуск 2 (26). С.222-229.
- [5]. Гуртовий А.Г. Безыгбная уточненная модель деформирования многослойных плит на недеформируемом основании / А.Г. Гуртовий, С.А. Тынчук // Механика композитных материалов. 2006. Т. 42, № 5. С. 643–654.

DEFORMATION BY LOCAL LOADING OF MULTILAYERED PAVEMENTS OF ROADS AND BRIDGES ON A RIGID FOUNDATION

The stress-strain state (SSS) of multilayered pavements of roads and bridges as multilayered plates on a rigid foundation investigate by refined models of symmetrical SSS is offered. The design diagram of a transversely loaded plate is formed by supplementing it with a plate symmetric about the contact surface with the foundation. The features of SSS pavements of road and bridges on a rigid foundation under the action of local loads are shown.

УДК 691.32

ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ АРМОВАНОВОГО БЕТОНУ ЗА РАХУНОК МОДИФІКАЦІЇ КОНТАКТНОЇ ЗОНИ КОМПОЗИТНОЇ АРМАТУРИ

Жмурко Р.А., магістр

Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг

Сучасне будівництво вимагає впровадження нових конструкційних матеріалів, які поєднують у собі високу міцність зі стійкістю до агресивних впливів довкілля. Одним із таких рішень є впровадження неметалевої композитної арматури. Вона має суттєві переваги над сталевими аналогами: повну корозійну стійкість, малу густину та високу питому міцність. Особливо актуальним використання такої арматури є у сільському будівництві, де конструкції часто взаємодіють із мінеральними добривами, агресивними стоками та вологою.

Однак результативність роботи армованої конструкції безпосередньо залежить від надійності зчеплення арматури з бетоном. Саме адгезія на межі розподілу «цементний камінь - композитний стрижень» є визначальним фактором, що забезпечує спільну роботу матеріалів. Традиційні методи механічного зчеплення не завжди дозволяють повною мірою реалізувати міцнісний потенціал композитів. Це пов'язано з низькою енергією поверхні полімерної матриці, що ускладнює формування міцного хімічного та фізичного зв'язку з продуктами гідратації цементу.

Проблема підвищення міцності армованого бетону вирішується шляхом комплексного підходу до підсилення адгезії. Перший напрямок - це механічна модифікація поверхні. Вона включає створення періодичного профілю або нанесення піщаного покриття на стрижень ще на етапі його виготовлення. Це дозволяє бетону «зачіплятися» за нерівності арматури, створюючи опір висмикуванню. Проте для досягнення максимального ефекту цього недостатньо, оскільки навколо полімерного стрижня часто утворюється пористий шар цементного каменю з низькою міцністю.

Другий, більш глибокий напрямок — це хімічна активація контактної зони. Розглядаються способи обробки поверхні арматури спеціальними складами, які сприяють утворенню активних хімічних зв'язків. Такі модифікатори дозволяють змінити характер взаємодії на молекулярному рівні. В результаті тверднення бетону на межі з арматурою формується щільна гібридна зона, яка практично не має дефектів та мікротріщин. Це суттєво підвищує сили тертя та молекулярного притягання, що особливо важливо при тривалій експлуатації конструкцій під навантаженням.

Важливу роль у підвищенні міцності відіграє також оптимізація складу бетону в зоні армування. Застосування мікронаповнювачів дозволяє максимально ущільнити структуру цементного каменю, що безпосередньо стикується до композиту. Це виключає капілярне накопичення вологи на контактній межі, що є критичним для запобігання деградації полімерного сполучного арматури. Таким чином, міцність бетону на межі з арматурою стає порівнянною з міцністю основного масиву бетону.

Практичне значення проведених досліджень полягає у можливості значного скорочення довжини анкерування арматури в бетоні. Це дозволяє економити матеріал та створювати більш компактні та легкі конструкції. Крім того, покращена адгезія сприяє кращому розподілу напружень, що зменшує ширину розкриття тріщин та підвищує тріщиностійкість елементів. У контексті сільського будівництва це означає подовження терміну служби споруд тваринницьких комплексів, складів та елементів зрошувальних систем.

Отже, результати дослідження доводять, що підвищення адгезії композитної арматури до цементного каменю є ключовим інструментом для

створення високоефективних та довговічних будівельних конструкцій нового покоління.

Висновки. На основі аналізу робіт щодо підсилення адгезії композитної арматури можна зробити такі висновки:

1. Визначено, що основним бар'єром для широкого впровадження композитної арматури є недостатня міцність контактної зони, яка обмежує спільну роботу матеріалів у залізобетоні.

2. Встановлено, що поєднання механічного оброблення поверхні стрижнів та хімічної активації полімерної матриці дозволяє суттєво підвищити сили зчеплення з цементним каменем.

3. Доведено, що створення щільної мікроструктури бетону навколо арматурного стрижня запобігає передчасному проковзуванню арматури та покращує несучу здатність конструктивних елементів.

4. Впровадження запропонованих методів підсилення адгезії дозволяє створювати корозійностійкі конструкції з подовженим терміном експлуатації, що є економічно вигідним для аграрного та промислового секторів будівництва.

1. Ал-Хаварі Ю.Р. Підвищення міцності армованого бетону за рахунок підсилення адгезії композитної арматури до цементного каменю [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Ю.Р. Ал-Хаварі. Харків, 2018. 161 с.

2. Стороженко, Л.І. Залізобетонні конструкції в незмінній опалубці [Текст] / Л.І. Стороженко, О.І. Лапенко. Полтава: АСМІ, 2008. 312 с.

3. ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012 Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою [Текст]. К.: Мінрегіон України, 2013. 46 с.

ENHANCEMENT OF REINFORCED CONCRETE STRENGTH BY MODIFICATION OF THE CONTACT ZONE OF COMPOSITE REINFORCEMENT

The work considers the problem of insufficient adhesion of composite reinforcement to cement stone, which limits its wide application in construction. The analysis of methods for strengthening the contact zone is carried out: mechanical modification of the bar surface and chemical activation of the polymer matrix. The role of concrete microstructure compaction in the reinforcement zone is shown. The practical significance of the research is to reduce the anchorage length and increase the durability of structures in the agricultural and industrial sectors.

УДК 539.3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НЕТОНКИХ ПОЛОГИХ ОРТОТРОПНИХ ОБОЛОНОК З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ЗБУРЕНЬ

Зеленський А. Г., д. ф.-м. н., проф., Слободянюк С. О., д.т.н., проф.
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпро

Уточнені теорії розрахунку пластин і оболонок розвивались у багаточисельних українських і зарубіжних наукових працях, зокрема в [1–3]. Уточнені теорії базуються на використанні певних фізичних і кінематичних гіпотез. Теорії, які не використовують ніяких припущень чи гіпотез, і розглядають усі компоненти напружено-деформованого стану (НДС) як функції трьох просторових координат відносяться до варіантів математичної теорії (МТ). Ефективність цих теорій залежить від методології отримання диференціальних рівнянь рівноваги, точності задоволення граничних умов, методики зведення граничних задач до відповідних крайових задач, тощо. Розробка варіантів МТ в основному пов'язана з працями українських механіків [4–11]. У роботі [5] розроблено енергоасимптотичний метод, а в [7, 9, 10] – метод взаємозв'язаних рівнянь. У [3, 6, 8–11] виконані огляди розвитку теорій. У [12] започаткований метод збурень, а в [13–15] цей метод розвинений і узагальнений в механіці. Для анізотропних нетонких пластин і оболонок варіанти МТ призводять до ускладнених і громіздких диференціальних рівнянь. Тому актуальним є розробка математичних методів розв'язання граничних задач для цих елементів конструкцій. У цій роботі розроблено моделювання НДС нетонких пологих ортотропних оболонок з використанням варіанта МТ нетонких пологих ізотропних оболонок і методу збурень ізотропних властивостей матеріалу.

З позицій тривимірної теорії пружності розглядається нетонка ортотропна полога оболонка подвійної кривини в прямокутній системі координат. Довільне поперечне навантаження вважається прикладеним до верхньої і нижньої лицевих поверхонь. Граничні умови на бічній поверхні оболонки можуть бути довільними – кінематичними, статичними або змішаними: Моделювання НДС ортотропної оболонки зведено до деякої усередненої ізотропної оболонки з послідуочим уточненням НДС ортотропної оболонки з використанням варіанта МТ нетонких пологих оболонок і методу збурень ізотропних властивостей матеріалу. Важливо підкреслити, що пропонуване моделювання не включає якихось гіпотез чи припущень щодо НДС. Моделі НДС розглядаються як варіанти зображень

компонент НДС на основі частинних сум за поліномами Лежандра у нескінченних рядах розкладання НДС оболонки з використанням методу збурень. Розроблено комбінований метод, оснований на методі малого параметра в поєднанні з розв'язанням усіх компонент НДС і граничних умов на бічній поверхні у ряди за поперечною координатою при допомозі поліномів Лежандра. Із варіаційного принципу Рейснера в наближенні А0-3 одержані рівняння рівноваги оболонки і крайові умови в довільному наближенні по малому фізичному параметру ε , який характеризує відносне відхилення ортотропних характеристик від ізотропних. Отримана рекурентна система взаємозв'язаних диференціальних рівнянь рівноваги 22-го порядку:

Гранична задача варіанта МТ нетонких ортотропних пологих оболонок у наближенні А0-3 зведена до нескінченної рекурентної послідовності лінійних двовимірних крайових задач для оболонок із осередненими ізотропними властивостями. Праві частини отриманих систем диференціальних рівнянь і крайові умови в довільному наближенні за параметром ε лінійно залежать від НДС попередніх наближень. Отримана система неоднорідних диференціальних рівнянь в кожному наближенні по ε перетворена, і при певних умовах розділена на дві: одна описує вихровий крайовий ефект (6-го порядку) і уточнює внутрішній НДС, а інша (неоднорідна 16-го порядку) визначає взаємозв'язані внутрішній НДС із потенціальним крайовим ефектом. Система вихрового крайового ефекту розділена на систему рівнянь кососиметричного (4-го порядку) і рівняння симетричного деформування (2-го порядку). Неоднорідна система 16-го порядку зведена розробленою методикою до зручної неоднорідної системи п'ятьох диференціальних рівнянь з однаковими лівими частинами.

Побудовані форми загальних розв'язків отриманих рівнянь. Виконані числові дослідження НДС нетонких пологих трансропних оболонок указують на ефективність підходу при несуттєвих відхиленнях ортотропних властивостей від ізотропних, при суттєвих потрібні вищі наближення.

Розроблене моделювання НДС може бути розвинено для зведення граничної задачі для пологої ортотропної оболонки до граничної задачі для трансропної пологої оболонки з використанням методу збурень трансропних властивостей, що підвищить точність розв'язку.

[1] Шереметьев М. П., Пелех Б. Л. К построению уточненной теории пластин. Инж. журнал. 1964, 4 (3), С. 504–509.

[2] Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. М.: Наука, 1967.

[3] Гузь О.М., Григоренко Я.М., Бабич І. Ю. та ін. Механіка елементів конструкцій, Механіка композиційних матеріалів та елементів конструкцій: У 3 томах; Т. 2, Київ: Наука думка, 1983.

[4] Хома І. Ю. Про крайові задачі теорії згину слабоортотропних пластин. Доп. АН УРСР. Сер. А. 1972, №3, С. 257–260.

- [5] Прусаков А. П. О построении теории изгиба пластин средней толщины энергоасимптотическим методом. Прикл. механика. 1975, 11 (10), С. 44–51.
- [6] Гуляев В. И., Баженов В. А., Лизунов П. П. Неклассическая теория оболочек и ее приложение к решению инженерных задач. Львов: Изд-во Львовского ун-та, 1978.
- [7] Прусаков А. П. О построении уравнений изгиба двенадцатого порядка для трансверсально-изотропной пластины. Прикл. механика. 1993, 29 (12), С. 51–58.
- [8] Бурак Я. Й., Рудавський Ю. К., Сухорольський М. А. Аналітична механіка локально навантажених оболонок. Львів: “Інтелект-Захід”, 2007.
- [9] Зеленський А. Г. Варіант математичної теорії ортотропних і фізично нелінійних нетонких пластин. Монографія. Дніпро: ПДАБА, 2023.
- [10] Зеленський А. Г. Варіант математичної теорії нетонких трансверсально-ізотропних пологих оболонок. Монографія, Дніпро, УДУНТ, ПДАБА, 2024.
- [11] Немиш Ю. Н., Хома И. Ю. Напряженно-деформированное состояние нетонких оболочек и пластин. Обобщенная теория (Обзор). Прикл. механика. 1993, 29 (11), С. 3–32.
- [12] Крилов М. М., М. М. Боголюбов М. М. Про деякі формальні розклади нелінійної механіки, Записки Всеукраїнської академії наук, Серія №5, Вид. АН УРСР. 1934, С. 1–89.
- [13] Савин Г. Н., Немиш Ю. Н. Метод возмущений упругих свойств в механике твердых деформируемых тел. ДАН СССР. 1974, 216 (1), С. 53–55.
- [14] Гузь А. Н., Немиш Ю. Н. Методы возмущений в пространственных задачах теории упругости. К.: Вища школа, 1982.
- [15] Кубенко В. Д., Немиш Ю. Н., Шнеренко К. И., Шульга Н. А. Метод возмущений в краевых задачах механики деформируемых тел. Прикл. механика. 1982, 18 (11), С. 3–20.

MODELING THE SPATIAL STRESS-STRAIN STATE OF NON-THIN SHALLOW ORTHOTROPIC SHELLS USING THE PERTURBATION METHOD

From the standpoint of the three-dimensional theory of elasticity, the stress-strain state of non-thin orthotropic shallow shells of constant thickness is modeled. The modeling is based on the reduction of the boundary value problem for a shallow orthotropic shell to a sequence of corresponding boundary value problems for non-thin shallow isotropic shells. A variant of the mathematical theory of isotropic shallow shells of arbitrary constant thickness and the perturbation method are used. All components of the stress-strain state, static and kinematic boundary conditions on the lateral surface are functions of three coordinates. They are depicted as double infinite series in a small physical parameter and a transverse coordinate using Legendre polynomials. The three-dimensional boundary value problem is reduced to a two-dimensional boundary value problem using the Reissner's variational principle. The methodology for constructing the equations is such that the boundary static conditions for transverse loads on the upper and lower surfaces of the shell are fulfilled exactly. The boundary value problem is reduced to recurrent systems of differential equations. The order of the systems of differential equations of equilibrium increases with an increase in the number of terms in the partial sums of the series in Legendre polynomials. A method for solving these systems is developed. The equations of vortex boundary effects and the equations of internal stress-strain state with potential boundary effect are highlighted. The forms of general solutions are obtained. Calculations are performed that substantiate the effectiveness of such modeling.

УДК 519.87:631.41

МОДЕЛЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ГРУНТОВИХ МАСИВІВ У БАГАТОШАРОВІЙ КОНСТРУКЦІЇ

**Зятюк Ю.Ю., к.т.н., доц., Кузло М.Т., д.т.н., проф., Кушнір В.П.,
к.ф.-м.н., доц.**

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

Моделювання деформацій ґрунтових основ у складі багатошарових конструкцій дорожнього одягу є одним із ключових завдань сучасної дорожньої геотехніки, оскільки точність прогнозування напружено-деформованого стану системи «дорожнє покриття – основа» безпосередньо визначає довговічність та експлуатаційну надійність автомобільних доріг. Особливу увагу приділяють вертикальним деформаціям, які спричиняють нерівномірні осідання шарів дорожньої конструкції та можуть призводити до утворення тріщин, колійності й передчасного руйнування покриття [1].

Сучасні дослідження демонструють підвищену увагу до моделювання деформацій ґрунтових мас у складі багатошарових дорожніх конструкцій, зокрема в межах нелінійних розрахункових моделей, що підвищують точність прогнозування напружено-деформованого стану [2–5]. Отримані результати підтверджують визначальний вплив фізико-механічних властивостей ґрунтів на формування вертикальних переміщень і нерівномірних осідань у дорожніх системах.

Підвищення точності розрахункових оцінок забезпечується застосуванням чисельних методів, насамперед методу скінченних елементів, із урахуванням нелінійного характеру деформування ґрунтів, що суттєво впливає на прогноз осідань багатошарових дорожніх конструкцій. Важливими факторами моделювання є також водонасичення, змінна вологість, тривалі та циклічні навантаження, а також сезонні впливи, зокрема температурні коливання і промерзання ґрунтів. Підвищення достовірності результатів досягається шляхом удосконалення розрахункових схем і конститутивних моделей ґрунтового середовища [6–8].

Незважаючи на значний обсяг виконаних досліджень у сфері проектування основ дорожніх одягів, проблема комплексної оцінки вертикальних деформацій ґрунтових мас у реальних умовах експлуатації залишається недостатньо вирішеною. Це обґрунтовує необхідність удосконалення існуючих математичних моделей та розрахункових підходів для підвищення достовірності прогнозування роботи багатошарових

дорожніх конструкцій [9–10]. У сучасному дорожньому будівництві та при проектуванні основ будівель і багатошарових конструкцій дорожнього одягу все більшого значення набуває моделювання деформацій ґрунтових мас, зокрема у вертикальному напрямку. Особливої актуальності зазначена проблема набуває в умовах інтенсивного транспортного навантаження, змінного водно-вологісного режиму та сезонних кліматичних впливів [11].

Вибір відповідної розрахункової моделі та чисельного методу аналізу визначається інженерно-геологічними умовами майданчика, конструктивним типом дорожнього одягу або фундаменту, а також характером та режимом навантаження [12–17].

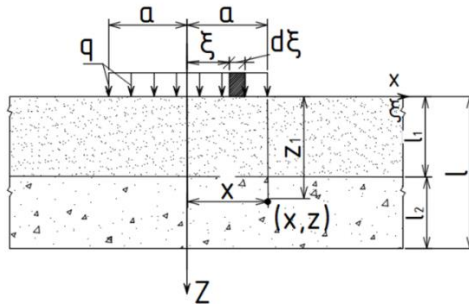


Рис. 1. Напруження в точці (x, z) , зумовлене рівномірно розподіленим навантаженням q , прикладеним на інтервалі $(-a, +a)$

Математична модель даної задачі буде складатися з рівнянь НДС ґрунту, що записані у переміщеннях. Рівняння НДС ґрунту у переміщеннях записуються у вигляді:

$$(\lambda_1 + 2\mu_1) \frac{d^2 w_1}{dz^2} = X, z \in (l_1, l), \quad (1)$$

$$(\lambda_2 + 2\mu_2) \frac{d^2 w_2}{dz^2} = X, z \in (0, l_1), \quad (2)$$

Умови спряження на межі запишуться у вигляді:

$$w_1(l_1) = w_2(l_1), \quad (3)$$

$$(\lambda_1 + 2\mu_1) \frac{dw_1(l_1)}{dz} = (\lambda_2 + 2\mu_2) \frac{dw_2(l_1)}{dz}. \quad (4)$$

$$F(z) = \left(0.5\xi z \ln \left(1 + \frac{z^2}{\xi^2} \right) + 0.25z^2 \operatorname{arctg} \frac{\xi}{z} - 0.75\xi z + 0.75\xi^2 \operatorname{arctg} \frac{z}{\xi} \right) \Bigg|_{\xi=-a}^{\xi=a}$$

$$= a z \ln \left(1 + \frac{z^2}{a^2} \right) + 0.5z^2 \operatorname{arctg} \frac{a}{z} - 1.5az + 1.5a^2 \operatorname{arctg} \frac{z}{a} =$$

$$0.5a z \left(2 \ln \left(1 + \frac{z^2}{a^2} \right) - 3 \right) + 0.25\pi z^2 + 0.5 (3a^2 - z^2) \operatorname{arctg} \frac{z}{a}.$$

Висновки. Порівняльний аналіз отриманих результатів для різних значень горизонтальної координати x демонструє узгодженість розрахункових залежностей та відсутність різких аномалій або розривів, що підтверджує чисельну стійкість і коректність запропонованого підходу моделювання. Таким чином, запропонований метод моделювання забезпечує високу точність і надійність визначення вертикальних деформацій ґрунтових масивів, адекватно відображає зміну напружено-деформованого стану залежно від глибини та просторового положення навантаження, і може бути ефективно застосований у практичних інженерних розрахунках основ дорожніх конструкцій та ґрунтових основ.

- [1] Kuzlo M. T. Inzhenerno-heolohichni vyshukuvannya, gruntoznavstvo ta mekhanika gruntiv : navch. posib. [Elektronne vydannya]. – Rivne : NUWEE, 2024.– 267 p.
- [2] Terzaghi K., Peck R. B., Mesri G. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. 592 p.
- [3] Potts D. M., Zdravković L. *The Finite Element Method in Geotechnical Engineering*. London: Thomas Telford, 1999. 427 p.
- [4] Kendzera O., Semenova Yu. Deformatsiini kharakterystyky rozrakhunkovykh modelei gruntovoi tovshchi // *Visnyk Kyivskiy natsionalnyi universytet imeni Tarasa Shevchenka*. Seriya: Heolohiia. 2025. № 78. S. 25–33. DOI: 10.17721/1728-2713.78.03..
- [5] Hudak V., Kril T., Zatserkovnyi V. Dystantsiinyi monitorynh vertykalnykh zmishchen zemnoi poverkhni yak indykator deformatsii gruntovykh masyviv // *Visnyk Kyivskiy natsionalnyi universytet imeni Tarasa Shevchenka*. Seriya: Heolohiia. 2025. № 79. S. 40–48.
- [6] Demessie M., Hretskiy D., Prianiuk S. Deformatsii budivel, sprychyneni nerivnomirnymy osidanniamy osnov // *Naukovi pratsi Vinnytskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet*. 2025. № 2. S. 112–118.
- [7] Boiko I., Oliinyk A., Haleta A. Metodyka identyfikatsii deformatsiinykh parametriv gruntovoho masyvu // *Osnovy i fundamente*. 2021. № 42. S. 53–63. DOI: 10.32347/0475-1132.42.2021.53-63.
- [8] Piatkov O., Zhuk V., Poliukhovych O. Vplyv efektu zimiattia hlynistykh gruntiv na rezultaty laboratornykh doslidzhen // *Zbirnyk naukovykh prats Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury*. 2020. № 36. S. 89–95..
- [9] Vynnykov Yu., Kostochka N., Miroschnychenko I. Vyznachennia osidannia osnovy budivel z urakhuvanniam styslyvosti gruntiv // *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*. 2015. № 7. S. 15–21. DOI: 10.15802/bttrp2015/90751.

- [10] Principles of Geotechnical Engineering. 9th ed. Cengage Learning, 2018.
- [11] Geotechnical Engineering of Dams. CRC Press, 2014.
- [12] Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. Transportation Research Board, 2004.
- [13] Das B. M., Sobhan K. Principles of Geotechnical Engineering. 9th ed. Boston: Cengage Learning, 2018. 768 p.
- [14] Huang Y. H. Pavement Analysis and Design. 2nd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004. 775 p.
- [15] Numerical investigation of pressure head jump values on a thin inclusion in one-dimensional non-linear soil moisture transport problem / Martyniuk, P.M., Michuta, O.R., Ulianchuk-Martyniuk, O.V., Kuzlo, M.T. // International Journal of Applied Mathematics, 2018, 31(4), pp. 649–660 URL: 10.12732/ijam.v31i4.10.
- [16] The conditions of conjugation in the tasks of moisture transfer on a thin clay inclusion taking into account salt solutions and temperature / Chui, Y., Martyniuk, P., Kuzlo, M., Ulianchuk-Martyniuk, O. // Journal of Theoretical and Applied Mechanics Bulgaria Open source preview, 2019, 49(1), pp. 28–38 URL: https://jtambg.eu/papers/2019/JTAM2019_1_028-038.pdf.
- [17] Wood D. M. *Geotechnical Modelling*. Boca Raton: CRC Press, 2004. 488 p.
- [18] The Finite Element Method in Geotechnical Engineering. London: Thomas Telford Publishing, 1999.

MODELING OF VERTICAL DEFORMATIONS OF SOIL MASSES IN A MULTILAYER STRUCTURE

Modeling of vertical deformations of soil masses in multilayer structures is one of the key tasks of modern geotechnics, since the accuracy of predicting the stress-strain state of the subgrade directly determines the reliability and durability of transportation infrastructure. Particular attention is paid to the analysis of vertical deformations, which influence the magnitude and non-uniformity of settlements and may lead to structural damage. The paper summarizes current approaches to soil deformation modeling, including numerical techniques and the finite element method. Recent studies considering nonlinear soil behavior, water saturation, load duration, and variations in physical and mechanical properties are analyzed.

УДК624.072

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЗАЛЬТОБЕТОННИХ БАЛОК

Карпюк І.А., д.т.н., доц., Карпюк М.В. студ.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Проведено комплексне моделювання специфічного напружено-деформованого стану, що виникає в базальтобетонних балках під навантаженням. У сучасній світовій інженерній практиці спостерігається стійка тенденція до заміщення класичної металевої арматури інноваційними аналогами, зокрема склопластиковою та базальтопластиковою композитною арматурою. Ці матеріали знаходять своє критично важливе застосування під час зведення та експлуатації конструкцій у складних умовах агресивного зовнішнього середовища, що характерно для об'єктів водного господарства, розгалужених меліоративних систем та берегозахисних гідротехнічних споруд. Крім того, композити стають незамінними при будівництві сучасних інженерних мереж, а також елементів проїзної частини мостових переходів.

Крім виняткової стійкості до корозійних процесів у хімічно активних середовищах, композитна арматура володіє переліком унікальних фізичних властивостей, серед яких: надзвичайно низький коефіцієнт теплопровідності; високі діелектричні характеристики; повна немагнітність, що суттєво розширює потенційні сфери її практичного впровадження. Протягом останніх років в Україні було успішно налагоджено власне промислове виробництво та розроблено відповідну нормативну базу у вигляді технічних умов на виготовлення скло- та базальтопластикової арматури. Якість цієї продукції повністю відповідає суворим критеріям міжнародних стандартів. Однак, попри технологічну готовність виробництва, повноцінне використання композитної арматури в реальній будівельній практиці України залишається обмеженим через гострий дефіцит фундаментальних експериментально-теоретичних досліджень. Зокрема, бракує даних щодо: фактичної міцності та жорсткості згинальних елементів; показників тріщиностійкості таких конструкцій; спеціалізованих державних нормативних документів із проектування. Основним стримуючим фактором для активного впровадження цих матеріалів є відсутність перевірених та максимально достовірних методик для розрахунку їхньої загальної несучої здатності. З огляду на це, автори присвятили свою роботу детальному вивченню напружено-деформованого стану балок, виготовлених із базальтобетону, з особливим фокусом на харак-тер сумісної роботи бетону та внутрішньої базальтопластикової арматури.

Ключовими науковими завданнями були:

1. Проведення порівняльного аналізу результатів теоретичних розрахунків міцності похилих перерізів дослідних зразків балок, що мають армування типу BFRP.

2. Перевірка гіпотези щодо можливості точного відтворення результатів натурних експериментів у цифровій моделі.

3. Визначення найбільш імовірної схеми механічного руйнування базальтобетонних балок за допомогою обчислювальних потужностей програмного комплексу «Ліра-САПР».

У ході реалізації науково-дослідних експериментів та подальшої обробки даних було виконано глибокий порівняльний аналіз реальної несучої здатності похилих перерізів дослідних зразків із тими показниками, що були отримані шляхом комп'ютерного моделювання. Дослідникам вдалося зафіксувати точні значення прогинів, параметри деформації бетонного масиву та базальтопластикових стержнів. Також були сформовані візуальні ізополя розподілу переміщень та внутрішніх напружень у балках безпосередньо перед настанням фази руйнування.

RESEARCH AND MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF BASALT CONCRETE BEAMS

Research presents a comprehensive simulation of the specific stress-strain state occurring in basalt-concrete beams under external loading. The relevance of the study is driven by the global engineering trend toward replacing traditional steel reinforcement with innovative composite alternatives, specifically Basalt Fiber Reinforced Polymer. These materials are critical for structures operating in aggressive environments, such as water management facilities, irrigation systems, coastal protection structures, and bridge deck components. Beyond exceptional corrosion resistance, composite reinforcement possesses unique physical properties: low thermal conductivity, high dielectric performance, and complete non-magnetic behavior. Despite established industrial production of BFRP in Ukraine, its implementation in real-world construction remains limited due to a deficit of fundamental experimental and theoretical research. Specifically, there is a lack of verified methodologies for calculating the strength, stiffness, and crack resistance of flexural elements. Consequently, the authors focused on a detailed study of the collaborative performance between concrete and basalt-fiber reinforcement. The key research objectives included: a comparative analysis of the strength of inclined sections, verification of the hypothesis regarding the accuracy of digital reproduction of full-scale experiments, and identification of mechanical failure patterns using the LIRA-SAPR software package. During the study, a deep comparison was performed between the actual load-bearing capacity and the indicators obtained through computer modeling. The researchers successfully recorded precise deflection values and deformation parameters for both the concrete matrix and the reinforcing bars. The generated visual isofields of displacement and internal stress distributions immediately prior to the failure phase provide a robust theoretical foundation for the development of future state design codes for basalt-concrete structures.

УДК 624.04

ВПЛИВ ПОЧАТКОВОЇ ГЕОМЕТРІЇ НА РЕЗУЛЬТАТИ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ФЕРМОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Кіріченко Д.О., д.ф.

Одеська державна академія архітектури та будівництва, м. Одеса

Чистяков А.О., д.ф.

Словацький технічний університет в Братиславі, м. Братислава
Університет Ліннея, м. Векше

На сьогоднішній день в інженерному проектуванні все більшого значення набувають методи, що спрямовані на підвищення ефективності конструкцій при одночасному зменшенні їх матеріалоемності. Одним із таких підходів є топологічна оптимізація. Вона дозволяє виконати раціональний розподіл матеріалу у вказаній області із урахуванням навантажень та граничних умов. При застосуванні топологічної оптимізації обумовлюється необхідністю створення легких, міцних та економічно ефективних конструкцій, які відповідають сучасним вимогам енергоефективності та сталого розвитку. В свою чергу, це неоднаразово підкреслює актуальність даної тематики.

Топологічна оптимізація це важливий інструмент для проектування легких та конструктивно ефективних компонентів, особливо в галузі адитивного виробництва. Однак вплив вихідної проектною галузі на кінцеву оптимізовану геометрію часто ігнорується. В даному дослідженні вивчається вплив вихідної геометрії на результати топологічної оптимізації фермових конструкцій, виготовлених із дерево-полімерного композиту (ДПК). Усі необхідні механічні ДПК визначалися експериментальним шляхом проведення випробувань на розтяг та згин відповідно до міжнародних стандартів ISO 527-4:2023 та EN 310:1993 [1,2]. За отриманими результатами були побудовані діаграми «напруження–деформація» для різних напрямків навантаження відносно орієнтації волокон, що сформовані в процесі 3D-друку. Отримані залежності дозволили врахувати особливості механічної поведінки матеріалу при різних схемах навантаження.

Експериментальні результати продемонстрували нелінійний характер роботи матеріалу, а також відмінності у його поведінці при розтягу та стиску. Даний експеримент підтверджував анізотропні властивості композиту, обумовлені технологією адитивного виготовлення та орієнтацією матеріалу під час 3D-друку. Побудовані робочі діаграми були використані для створення моделі, що була впроваджена в чисельний розрахунок методом

скінченних елементів [3]. Був виконаний аналіз двох підходів до оптимізації за однакових граничних умов та навантаження для фермової конструкції. У першому підході топологічна оптимізація застосовувалася до вже заздалегідь визначеної конструкції ферми (рис. 1). У другому – використовувалася суцільна трапецієподібна проектна область за аналогічними габаритами, в свою чергу з якої подалі було згенеровано ефективну фермову конструкцію. Чисельні розрахунки спочатку проводилися на базі використання методу скінченних елементів у програмному середовищі SOFiSTiK, тоді як топологічна оптимізація виконувалася в ANSYS Discovery, що реалізував спрощений підхід до методу скінчених елементів із можливістю інтерактивного аналізу [4]. Властивості матеріалу ДПК визначалися модулем пружності 2295 МПа, межею міцності розтягування 15,3 МПа і коефіцієнтом Пуассона 0,244. У середині прольоту дане зосереджене навантаження 115 Н.

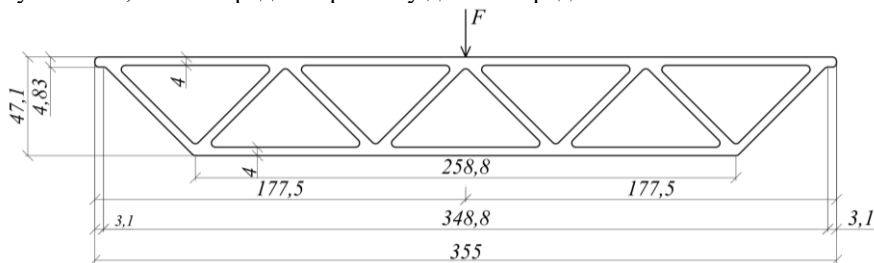


Рис. 1. Розрахункова схема навантаженої ферми

У першому випадку оптимізація виконувалася для вже сформованої фермової структури, що обмежувало можливість перерозподілу матеріалу лише в межах існуючої геометрії (рис. 2). Отримані результати показали часткове покращення ефективності конструкції, однак загальна схема залишилась близькою до вихідної.

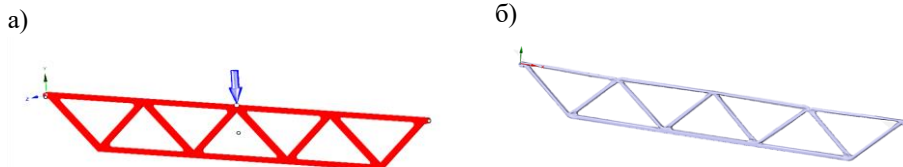


Рис. 2. Топологічна оптимізація попередньо заданої ферми в ANSYS Discovery: а) вихідна модель; б) оптимізована конструкція

У другому випадку топологічна оптимізація проводилася в межах суцільної області, що дозволило сформувану нову конструктивну схему відповідно до природних шляхів передачі навантаження. У результаті була отримана більш раціональна ферменна структура (рис. 3).

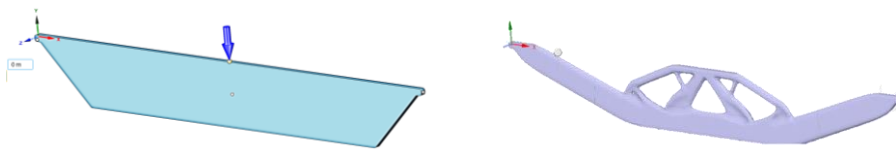


Рис. 3. Топологічна оптимізація із суцільної області в ANSYS Discovery
 Для оцінки ефективності отриманих конструкцій було проведено порівняльний аналіз їх напружено-деформованого стану (табл. 1).

Таблиця 1

Значення НДС оптимізованих ферм

Параметр	Ферма	Трапеція
Максимальний прогин f , мм	3,53	1,09
Максимальні напруження σ , МПа	19	13,1
Відносні деформації ε_{\max}	0,00163	0,00108

В результаті було встановлено, що використання суцільної області, як початкової геометрії, забезпечує більш раціональний розподіл матеріалу, що проявляється у зменшенні концентрацій напружень і більш рівномірному розподілу деформацій. Показано, що максимальні напруження зменшуються приблизно на 30 %, а деформації — до 40 % порівняно зі звичайною фермою. Отримані результати свідчать про доцільність застосування суцільних проектних областей при топологічній оптимізації конструкцій для адитивного виробництва та будівництва в цілому.

- [1]. ISO 527-4:2023. Plastics — Determination of tensile properties [in English].
 [2]. EN 310:1993 - Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength [in English].
 [3]. Bendsoe M. P., Sigmund O. Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. – Berlin: Springer, 2003.
 [4]. Lazareva D. V., Soroka M. M., Shilyaev O. S., red. M. G. Surianinov. (2020). Прийоми роботи з ПК ANSYS при розв'язанні задач механіки. [Methods of working with ANSYS software when solving mechanical problems]. Odessa. ODABA [in Ukrainian]. 431 p.

INFLUENCE OF INITIAL GEOMETRY ON TOPOLOGY OPTIMIZATION OF TRUSS STRUCTURES

Topology optimization has become an important tool for the design of lightweight and structurally efficient components, particularly in the field of additive manufacturing. However, the influence of the initial design domain on the final optimized geometry is often ignored. This study examines the influence of the initial geometry on the topology optimization results of truss structures made of wood-plastic composites.

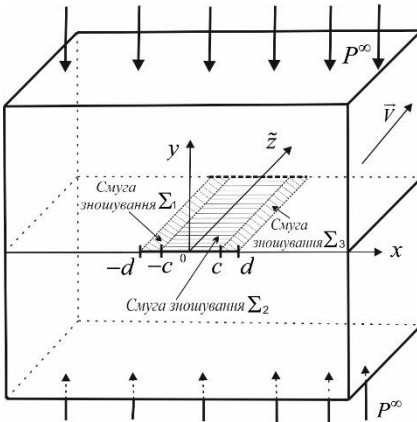
УДК 539.3

ЛОКАЛЬНЕ ЗНОШУВАННЯ ПРУЖНИХ ТІЛ ЗА КУСКОВО-ОДНОРІДНОГО КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ

Козачок О.П., к.ф.-м.н., ст. досл., Маланчук Н.І., к.ф.-м.н., ст.н.с.
 Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача
 НАН України, м. Львів

Мартиняк Р.М., д. ф.-м.н., проф.
 Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, м. Київ

Розглянемо контактну взаємодію двох ізотропних пружних півпросторів, що перебувають у стані плоскої деформації та взаємодіють під дією рівномірно розподіленого навантаження на нескінченності P^∞ . Нижче з тіл вважається нерухомим, інше рухається з постійною швидкістю V в напрямку осі z . Припускаємо, що сили тертя виникають



лише вздовж трьох симетрично розташованих нескінченних смуг Σ_i , $i = 1; 2; 3$. На першій смузі коефіцієнт тертя рівний f_1 , на другій – f_2 , а на третій – f_3 ($f_3 = f_1$). Сили тертя τ підпорядковані закону Амонтона: $\tau = \tau_{y\%} = f_i P$, де P – контактний тиск. Поза смугами Σ_i тертя відсутнє і відбувається гладкий контакт. Досліджуватимемо локальне зношування спряжених

поверхонь уздовж смуг Σ_i , виходячи з моделі фрикційного втомного зношування Андрейківа–Панасюка–Чернеця [1], згідно з якою стирання розпочинається на тих ділянках, де сила тертя τ перевищує порогове значення τ_0 . Вважаємо навантаження таким, що в початковий момент часу $t=0$ умова $\tau > \tau_0$ виконується вздовж смуг Σ_i . Не обмежуючи загальності, вважаємо, що стирання лише верхнє тіло. Застосуємо лінійний варіант моделі, у якому швидкість зношування лінійно залежить від тиску

$$\partial r(x,t)/\partial t = BV [f_i P(x,t) - \tau_0], \quad |x| \leq d, \quad (1)$$

де $r(x, t)$ – товщина зношеного матеріалу; B – стала.

Використовуючи розвинутий у працях [2-4] метод, задачу звели до сингулярного інтегро-диференціального рівняння відносно функції $r(x, t)$:

$$\frac{\partial r(x, t)}{\partial t} = \frac{2Bf_iVG}{\pi(\kappa+1)} \int_{-d}^d \frac{r'_s(s, t)}{s-x} ds + BV(f_i P^\infty - \tau_0), \quad |x| \leq d. \quad (2)$$

де $\kappa = 3 - 4\nu$; G , ν – модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона матеріалу тіл. Функція $r(x, t)$ задовольняє початкову умову $r(x, 0) = 0$ та умови на лівому краї першої та правому краї третьої ділянок зношування: $r(-d, t) = 0$, $r(d, t) = 0$.

У процесі зношування контактний тиск на смугах Σ_i поступово зменшується і прямує до τ_0 / f_i при $t \rightarrow \infty$. Врахувавши цю асимптотичну поведінку і здійснивши в інтегро-диференціальному рівнянні (2) граничний перехід при $t \rightarrow \infty$, отримаємо рівняння для розрахунку товщини зношеного матеріалу $r(x) = r(x, \infty)$ після завершення зношування. Знайдено аналітичний розв'язок цього рівняння та визначено товщину зношеного матеріалу і контактний тиск після припрацювання поверхонь.

- [1]. Andreykiv A., Panasyuk V., Chernets M. A theory of wear of materials in dry friction. Soviet Materials Science. 1981. Vol. 2. No 2. P. 153–158.
- [2]. Martynyak R.M., Shvets' R.M., Glod A.V. Running in of moving half spaces in the case of partial wear of an asperity on the contact surface. Materials Science. 2003. Vol. 39. No 1. P. 54–63.
- [3]. Kozachok O.P. Local frictional wear of an elastic half-space with a regular system of protrusions. Materials Science. 2023. Vol. 59. No 1. P. 121–128.
- [4]. Kozachok O.P., Martynyak R.M., Malanchuk N.I. Contact interaction of bodies with flat surfaces under local wear along a streak. Strength Mater. 2025. Vol. 57. P. 939–946.

LOCAL WEAR OF ELASTIC BODIES WITH A PIECEWISE-HOMOGENEOUS COEFFICIENT OF FRICTION

The contact interaction of two elastic isotropic bodies is considered, taking into account local wear along a section with a piecewise homogeneous coefficient of friction. The model of frictional fatigue wear is used, according to which wear begins when the friction force reaches some critical value. The surface profile and contact pressure after wear was completed were investigated.

УДК 621.73.011

АНАЛІЗ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ОСАДЖУВАННІ ТА ПРОТЯГУВАННІ ЗАГОТОВОК ДЛЯ КУВАННЯ ГАКІВ

Колісник К.Д., аспірант, Чухліб В.Л., д.т.н., професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м.Харків,

Кування гаків великої вантажопідйомності супроводжується складним характером течії металу та нерівномірним розподілом пластичних деформацій [1]. Особливо це характерно для комбінованих процесів осаджування та протягування, які широко застосовуються при виготовленні таких поковок. Для аналізу напружено-деформованого стану заготовок перспективним є поєднання фізичного та чисельного моделювання процесів деформування.

Метою роботи є дослідження розподілу пластичних деформацій при комбінованому осаджуванні та протягуванні заготовок для кування гаків шляхом порівняння результатів фізичного та чисельного моделювання.

Експериментальні дослідження виконано методом фізичного моделювання із застосуванням свинцевих зразків марки С1, що використовувались як модельний матеріал для сталі 20 [2]. Дослідження проведено на циліндричних зразках зі співвідношенням $h/D = 1$ та $h/D = 2$. Для аналізу розподілу деформацій застосовано метод координатної сітки з кроком 4×4 мм. Поперечний переріз виконано через центральну частину зразка, а координатну сітку наносили на одну з половин перерізу. Осаджування виконано на ступінь деформації 50 %, після чого здійснювали протягування зі ступенем деформації 10 та 20% за схемами «по кільцю» та «по довжині». Для підвищення достовірності результатів кожен варіант експерименту повторювали тричі. Чисельне моделювання процесів осаджування та протягування виконано у програмному комплексі QForm UK [3].

Аналіз деформованої координатної сітки показав, що найбільша інтенсивність деформацій спостерігається в центральній частині поперечного перерізу зразка, тоді як у напрямку до крайніх зон величина деформацій зменшується. Порівняння експериментальних та чисельних результатів показало подібний характер зміни логарифмічних деформацій при осаджуванні та протягуванні. Для оцінки відповідності результатів фізичного та чисельного моделювання визначено коефіцієнти збіжності. Для більшості

комірок координатної сітки значення коефіцієнтів збіжності знаходяться в межах 0,8–1,2. Це свідчить про достатню адекватність чисельної моделі.

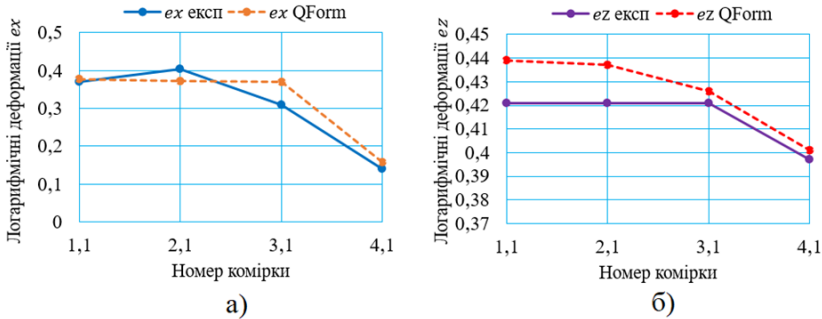


Рис. 1. Графіки експериментальних та чисельних логарифмічних деформацій:
а — e_x ; б — e_z

Отримані результати підтверджують можливість застосування програмного комплексу QForm UK для аналізу розподілу деформацій при комбінованих процесах осаджування та протягування. Встановлені закономірності розподілу деформацій можуть бути використані при розробленні технологічних процесів кування гаків великої вантажопідйомності.

- [1] Altan T., Ngaile G., Shen G. Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications. Materials Park: ASM International, 2005. 336 p.
- [2] Кухар В.В., Аніщенко О.С., Присяжний А.Г. Основи експериментальних методів дослідження процесів обробки металів тиском: навч. посіб. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. 235 с.
- [3] QForm UK Ltd. QForm — software for metal forming simulation. URL: <https://qform3d.com>

ANALYSIS OF THE DEFORMED STATE DURING UPSETTING AND DRAWING-OUT OF BILLETS FOR HOOK FORGING

The paper presents the results of experimental and numerical studies of combined upsetting and drawing-out processes used in heavy-duty hook forging. Experimental investigations were carried out using physical modelling with C1 lead specimens as a model material for steel 20. The coordinate grid method was applied to analyse the strain distribution in the billet cross-section. Numerical modelling of upsetting and drawing-out processes was performed using the QForm UK software package. The comparison of experimental and numerical results showed satisfactory agreement of logarithmic strain values and convergence coefficients. The obtained results confirm the applicability of QForm UK for analysing strain distribution during combined upsetting and drawing-out processes.

УДК 539.3:532.135:544.25

МЕТОД АНАЛОГІЙ У ТЕОРІЇ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ: ФІБРОКОМПОЗИТИ ТА РІДКІ КРИСТАЛИ

Семенова С.В., Колесников А.В.*, Загинайло І. В., Писаренко О.М.
Одеська державна академія будівництва та архітектури

Метод аналогій посідає особливе місце в теоретичній фізиці та механіці суцільних середовищ. У роботі систематично простежується глибока структурна подібність між теорією дисперсно-армованих матеріалів, армованих короткими волокнами приблизно однакової довжини, і теорією рідких кристалів (РК) – на всіх рівнях опису: від функцій розподілу орієнтацій і тензорів порядку до рівнянь еволюції орієнтаційного стану, реологічних конститутивних співвідношень і термодинамічних функціоналів вільної енергії. Встановлено, де ці аналогії є глибокими (рівень явного вигляду рівнянь), а де – лише якісними.

Статична аналогія ґрунтується на алгебраїчному зв'язку між тензором орієнтацій волокон другого порядку A_{ij} і Q -тензором нематика:

$$Q_{ij} = A_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij},$$

тобто Q -тензор є безслідною частиною тензора орієнтацій. Функції розподілу орієнтацій волокон $\psi(\mathbf{p})$ і молекул НРК $f(\mathbf{u})$ є об'єктами одного математичного класу: обидві визначені на одиничній сфері S^2 і задовольняють умові парної симетрії $\psi(\mathbf{p}) = \psi(-\mathbf{p})$. Допустими інваріанти аполярного тензора другого рангу – $\text{tr}(Q^2)$, $\text{tr}(Q^3)$, $\text{tr}(Q^4)$ – однакові для обох систем, що повністю визначає форму функціоналу вільної енергії.

Термодинамічна аналогія: функціонал вільної енергії орієнтаційного стану концентрованої суспензії волокон має ту саму структуру, що й вільна енергія де Жена для нематика:

$$f_{or} = \frac{a}{2} \text{tr}(A^2) - \frac{b}{3} \text{tr}(A^3) + \frac{c}{4} [\text{tr}(A^2)]^2,$$

де коефіцієнт $a \propto (\varphi - \varphi^*)$ змінює знак при критичній концентрації волокон φ^* – прямому аналозі температури просвітлення нематика T^* . Наявність кубічного члена, що визначається ненульовим інваріантом $\text{tr}(A^3)$ аполярного тензора, гарантує фазовий перехід першого роду між ізотропним

і орієнтаційно-впорядкованим станами. Рівноважне значення параметра порядку знаходиться з умов рівності вільних енергій і стійкості:

$$S_c = \frac{2b}{3c}, \quad \varphi_c = \varphi^* + \frac{2b^2}{9ac}.$$

Динамічна аналогія є найбільш вражаючою. Рівняння Фолгара-Такера для тензора орієнтацій волокон і рівняння Еріксена-Леслі для директора нематика мають ідентичну тензорну структуру.

У симетричній тензорній формі рівняння Фолгара-Такера записується як:

$$\mathcal{A}_{ij}^{\otimes} = (W_{ik} A_{kj} - A_{ik} W_{kj}) + \lambda (D_{ik} A_{kj} + A_{ik} D_{kj} - 2D_{kl} A_{klij}) + 2C_I \alpha_3^{-1} \delta_{ij} - A_{ij},$$

де W_{ij} і D_{ij} – антисиметрична і симетрична частини тензора градієнта швидкості, λ – параметр форми волокна, C_I – коефіцієнт взаємодії між волокнами.

У директорному наближенні ($A_{ij} \rightarrow n_i n_j$, повне вирівнювання) рівняння Фолгара-Такера зводиться до рівняння Еріксена-Леслі з ідентифікацією $\lambda \leftrightarrow (\alpha_3 + \alpha_2) / (\alpha_3 - \alpha_2)$. Замикаючі наближення для тензора четвертого порядку A_{ijkl} через A_{ij} є аналогами наближення самоузгодженого поля Майєра-Заупе у теорії РК.

Тензор напружень суспензії волокон відтворює всі шість незалежних членів тензора напружень Леслі з ідентифікацією коефіцієнтів Леслі α_i через об'ємну частку волокон φ , аспектне відношення r і параметр форми λ . Умова Пароді для нематика $\alpha_2 + \alpha_3 = \alpha_6 - \alpha_5$, що впливає із принципу Онзагера, має термодинамічний аналог у теорії суспензій.

Особливо глибокою є аналогія між дисперсно-армованим матеріалом із феромагнітними волокнами і смектичною мезофазою А. Дипольна магнітна взаємодія між намагніченими волокнами є анізотропною: волокна, розташовані торець до торця ($\theta = 0$), притягуються ($U \sim -2\mu_0 m^2 / r^3$), розташовані пліч о пліч ($\theta = \pi / 2$) – відштовхуються. Ця анізотропія є рушійною силою утворення шарової структури з параметром порядку позиційного впорядкування $\Psi_f = |\Psi_f| e^{i\phi_f}$. Повний опис стану такої системи вимагає двох незалежних параметрів порядку: орієнтаційного A_{ij} (аналог Q -тензора нематика) і позиційного Ψ_f (аналог параметра

сметичного порядку). Функціонал вільної енергії намагніченого фіброкомпозиту:

$$F_f = F_{or} + \int [\alpha_f |\Psi_f|^2 + \beta_f |\Psi_f|^4 + L_1 |(\nabla - iq_f \mathbf{n})\Psi_f|^2] dV,$$

є точним відображенням функціоналу де Жена для смектика А. Коваріантний градієнт $(\nabla - iq_f \mathbf{n})\Psi_f$ забезпечує зв'язок між позиційним і орієнтаційним параметрами порядку: якщо директор відхиляється від нормалі до шарів, виникає додаткова енергія, що прагне утримати їх перпендикулярними.

Словник відповідностей: Q -тензор нематика \leftrightarrow тензор орієнтацій волокон; параметр смектичного порядку $\Psi \leftrightarrow \Psi_f$; хвильовий вектор $q_0 \leftrightarrow q_f$; температура переходу нематик-смектик $T_{NA} \leftrightarrow$ критична концентрація φ_s . Мінімізація функціоналу F_f за Ψ_f дає рівняння типу Гінзбурга–Ландау, у лондонівській границі ($|\Psi_f| = \text{const}$) – рівняння для директора з характерною «лондонівською глибиною проникнення»:

$$\lambda_f = \sqrt{L_1 / (|\alpha_f| |\Psi_f|^2)}, \quad \xi_f = \sqrt{|L_1 / \alpha_f|},$$

де ξ_f — кореляційна довжина параметра розшарування. Параметр Гінзбурга–Ландау $\kappa_f = \lambda_f / \xi_f$ визначає тип переходу: при $\kappa_f < 1/\sqrt{2}$ – аналог смектика типу I (різкий перехід); при $\kappa_f > 1/\sqrt{2}$ — аналог смектика типу II (вихрова фаза, шарова структура пронизана решіткою дислокаційних ліній, аналог решітки Абрикосова). Ундуляційна нестабільність шарів при прикладеній деформації ϵ вздовж директора виникає при критичному значенні:

$$\epsilon_c \sim \pi^2 L_1 / (B_f R^2), \quad B_f = c_f |\Psi_f|^2 q_f^2,$$

що є точним аналогом нестабільності Херінга–Нілсона–Хелфріха для смектика А ($\epsilon_c \sim \pi^2 K_1 / (BR^2)$, $K_1 \leftrightarrow L_1$, $B_{sm} \leftrightarrow B_f$). Топологічні дефекти у шаровій структурі – дислокаційні лінії з вектором Бюргерса $b = nd_f$ — є аналогами дислокацій смектика і вихорів надпровідника в аналогії де Жена. Зони різкої зміни орієнтації волокон у фіброкомпозиті (орієнтаційні сингулярності з зарядами $m = \pm 1/2$) є прямими аналогами

дисклінацій нематика – обидва класи систем мають однаковий простір параметра порядку $\mathbf{RP}^2 = S^2 / \check{y}_2$ і фундаментальну групу $\pi_1(\check{Y}\mathbb{P}^2) = \check{y}_2$.

Межі застосовності аналогії: у рідких кристалах теплові флуктуації суттєві і роблять теорію Ландау лише якісно точною поблизу переходу; у фіброкомпозитах роль флуктуацій відіграють механічні зіткнення між волокнами (C_1 -член), і теорією Ландау є кількісно точною. Аналогія не охоплює процесів руйнування та дебондингу, нелінійної поведінки матриці, а також мікромеханічних методів обчислення ефективних пружних модулів (Ешелбі, Морі–Танаки), що не мають прямих відповідностей у теорії РК. Зворотне перенесення результатів можливе: апарат замикань для тензора A_{ijkl} у теорії фіброкомпозитів може надихнути нові підходи до замикань Q -тензорних рівнянь у динаміці РК.

THE METHOD OF ANALOGIES IN THE THEORY OF DISPERSION-REINFORCED MATERIALS: FIBRE COMPOSITES AND LIQUID CRYSTALS

The paper establishes a deep structural analogy between short-fibre composite theory and liquid crystal (LC) theory. The fibre orientation tensor A_{ij} and the LC Q -tensor are related by $Q_{ij} = A_{ij} - 1/3\delta_{ij}$. The Landau-type orientational free energy, the Folgar-Tucker and Ericksen–Leslie evolution equations, and the viscous stress tensors are shown to share identical tensorial structures. For magnetised fibre composites a double order parameter – orientational (A_{ij}) and positional (Ψ_f) – reproduces de Gennes' smectic-A free energy functional exactly, including the covariant-gradient coupling term. The Ginzburg-Landau parameter $\kappa_f = \lambda_f / \xi_f$ classifies the transition type; the Helfrich undulation instability threshold and Abrikosov-like dislocation lattices follow directly from the analogy. Limits of applicability and prospects for mutual transfer of results are discussed.

УДК 691.3:519.24

СТОХАСТИЧНА КІНЕТИКА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В'ЯЖУЧИХ СИСТЕМ

Семенова С. В.*, Колесников А. В., Олійник Т.П., Гедулян С.І.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Детерміністичні моделі структуроутворення в'язучих систем виявляються принципово недостатніми для опису спостережуваних явищ, оскільки флуктуації на мезо- та мікрорівнях визначають розгалуження траєкторій структурної еволюції у критичних точках. Реакції гідратації та полімеризації протікають у просторово неоднорідному середовищі, де локальні концентрації реагентів, розподіл пор і температурне поле підпорядковані статистичному розподілу. Макроскопічні властивості матеріалу є інтегральними характеристиками ансамблю мікроструктурних конфігурацій. Природним є перехід до ймовірнісного опису, об'єктом якого є не одна траєкторія, а розподіл імовірності по ансамблю структурних станів.

Фазовий простір будується на основі координат Мінковського — часток елементів різної топологічної розмірності: ξ_0 (ізольовані зерна, 0-вимірні), ξ_1 (лінійні агрегати), ξ_2 (поверхневі елементи, міжфазні межі), ξ_3 (зв'язні об'ємні фази). Ці координати задовольняють нормувальній умові (1):

$$\xi_0 + \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 1, \quad \xi_i \geq 0, \quad (1)$$

тобто вектор $\xi = (\xi_0, \xi_1, \xi_2, \xi_3)$ лежить у тривимірному симплексі $\Delta^3 \subset \check{Y}^4$. Координати Мінковського визначаються з аналізу плоских шліфів методом клітинного лічення (box counting): для об'єктів різної топологічної природи залежність кількості клітин від масштабу $N(\epsilon) \sim \epsilon^{-D}$ дає ефективну розмірність D , з якої стереологічними перерахунками відновлюється повний вектор ξ . Кожна точка $\xi \in \Delta^3$ відповідає морфологічній конфігурації мікроструктури, а траєкторія $\xi(t)$ — її еволюції в часі.

Стохастична динаміка у просторі Δ^3 описується стохастичним диференціальним рівнянням (у сенсі Іто) $d\xi = A(\xi)dt + B(\xi)dW$, де $A(\xi)$ — вектор дрейфу, $B(\xi)$ — матриця дифузії, dW — вінерівський

процес. Еквівалентне рівняння Фоккера–Планка (ФПК) для щільності імовірності $p(\xi, t)$ (2):

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\sum_i \frac{\partial}{\partial \xi_i} [A_i(\xi) p] + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial^2}{\partial \xi_i \partial \xi_j} [D_{ij}(\xi) p], \quad (2)$$

де $D(\xi) = B(\xi)B^T(\xi)$ — тензор дифузії. У дивергентній формі $\partial_t p = -\nabla_\xi \cdot J$, де вектор щільності потоку імовірності (3):

$$J_i(\xi, t) = A_i(\xi) p(\xi, t) - \frac{1}{2} \sum_j \frac{\partial}{\partial \xi_j} [D_{ij}(\xi) p(\xi, t)]. \quad (3)$$

Граничні умови на межі симплексу $\partial\Delta^3$ природно формулюються як відсутність нормальної компоненти потоку: $J \cdot n|_{\partial\Delta^3} = 0$, що забезпечує збереження нормування та невід'ємності координат. Стационарний розподіл $p_{st}(\xi)$ визначається умовою $\nabla_\xi \cdot J_{st} = 0$. Ефективний потенціал структури $\Phi(\xi) = -\ln p_{st}(\xi)$ відіграє роль, аналогічну вільній енергії Гіббса: його мінімуми відповідають найбільш імовірним морфологічним конфігураціям.

Ключовою ідеєю є термодинамічна декомпозиція потоку на потенціальну (дисипативну) та циркуляційну складові. Визначаючи $\Psi(\xi, t) = \ln p(\xi, t) - \ln p_{st}(\xi)$, отримуємо (4)

$$J_{pot} = -p(\xi, t) D(\xi) \nabla_\xi \Psi(\xi, t), \quad J_{circ} = J - J_{pot}. \quad (4)$$

Зважена ортогональність $\int_{\Delta^3} J_{pot} \cdot J_{circ} / p d\xi = 0$ гарантує адитивність внесків у ентропійний баланс. Швидкість зростання відносної ентропії Кульбака–Лейблера $S[p | p_{st}] = -\int p \ln(p / p_{st}) d\xi$ визначається виключно потенціальною складовою (5):

$$\sigma(t) = \frac{dS}{dt} = \int_{\Delta^3} \frac{|J_{pot}|^2}{pD} d\xi \geq 0. \quad (5)$$

Циркуляційна складова J_{circ} не вносить внеску у dS/dt і описує замкнені «кругові» рухи у просторі Δ^3 без зміни відносної ентропії. Умова детального балансу $J_{st} = 0$ еквівалентна зникненню J_{circ}^{st} ; якщо детальний

баланс порушено — система є істинно нерівноважною. Кількісним критерієм є (6):

$$\kappa(\xi) = \frac{|J_{circ}|}{|J_{pot}| + |J_{circ}|} \in [0, 1], \quad (6)$$

де $\kappa = 0$ відповідає чисто потенціальній динаміці (детальний баланс), $\kappa = 1$ — чисто циркуляційній. Потенціальна складова відповідає «реакційно-контрольованим» процесам, керованим афінністю реакцій та градієнтами концентрації; циркуляційна — конкурентним реакціям із петлями зворотного зв'язку, які не можуть бути описані через єдиний термодинамічний потенціал.

Для в'язучих систем різного складу «ландшафт» потенціалу $\Phi(\xi)$ має характерну топологію. У гіпсових системах формується єдиний виразний мінімум при домінуванні ξ_2 , ξ_3 , а $\kappa = 1$ — динаміка є переважно потенціальною. Цементні системи з конкуренцією між фазами CSH-гелю, портландитом та еtringітом мають кілька локальних мінімумів Φ ; гіпсоцементно-пуцоланові в'язучі (ГЦПВ) характеризуються $\kappa \sim 0.3$ – 0.5 . Геополімерні системи демонструють найскладнішу топологію та $\kappa \rightarrow 1$ на початкових стадіях тверднення.

Принцип мінімального виробництва ентропії у стохастичному формулюванні набуває вигляду: стаціонарне залишкове виробництво ентропії $\sigma_{st}^{(\lambda)} = \int |J_{circ}^{st}|^2 / (p_{st} D) d\xi$ мінімізується за заданих макроскопічних обмежень λ (склад в'язучого, водоцементне відношення, температура). Це дозволяє інтерпретувати «адаптацію» матеріалу до умов тверднення як досягнення стану мінімального залишкового виробництва ентропії — аналога мінімуму σ_{st} за Пригожиным. Варіабельність властивостей між зразками одного складу, що є добре відомим явищем, отримує точний кількісний опис: вона пов'язана з шириною розподілу $p(\xi, t)$ у просторі Δ^3 .

Зв'язок з GENERIC-формалізмом (General Equation for the Non-Equilibrium Reversible-Irreversible Coupling) дозволяє послідовно включати механічні, теплові та хімічні процеси у єдину термодинамічно узгоджену схему. Потенціальна складова потоку є градієнтним потоком функціоналу Кульбака–Лейблера у метриці Вассерштейна W_2 : $\partial_t p = -\text{grad}_{W_2} D_{KL}[p | p_{st}]$. Це представлення є математично суворим і має пряму матеріалознавчу інтерпретацію: система еволюціонує таким чином,

щоб мінімізувати транспортні витрати у просторі Δ^3 при наближенні до стаціонарного розподілу.

Запропонований формалізм відкриває підхід до цілеспрямованого управління структуроутворенням. Введення хімічних добавок, що усувають одну з конкурентних реакцій, зменшує \mathcal{K} і переводить динаміку у потенціальний режим з передбачуваним цільовим станом. Механічна активація збільшує $D(\xi)$, що дозволяє долати бар'єри між локальними мінімумами Φ . Задача оптимального матеріального дизайну формулюється як пошук умов λ , за яких стаціонарний розподіл ФПК найближче наближається до цільового $p^*(x)$, що відповідає заданим властивостям матеріалу. Цей підхід є кількісним і може бути реалізований поєднанням мікроструктурного аналізу шліфів, чисельного розв'язання ФПК і методів оптимального управління стохастичними системами.

STOCHASTIC KINETICS OF STRUCTURE FORMATION IN CEMENTITIOUS SYSTEMS: FOKKER–PLANCK FORMALISM IN MINKOWSKI SPACE AND THERMODYNAMIC DECOMPOSITION OF PROBABILITY FLOWS

A theoretical framework is developed for stochastic description of microstructure evolution in cementitious binders — gypsum, cement, gypsum-cement-pozzolan, and geopolymer systems. Minkowski functionals (volume, surface area, integral mean curvature, Euler–Poincaré number) serve as phase-space coordinates $\xi \in \Delta^3$. The Fokker–Planck equation in divergence form governs the probability density $p(\xi, t)$. The probability flux is decomposed into a potential (dissipative) component \mathbf{J}_{pot} , which drives the system toward the stationary distribution, and a solenoidal circulation component \mathbf{J}_{circ} , associated with non-equilibrium cyclic transformations. Entropy production is determined solely by \mathbf{J}_{pot} , while \mathbf{J}_{circ} characterises irreversible thermodynamic coupling. The framework is applied to classify structure-formation regimes across binder systems and to formulate principles of targeted microstructure design via control of flux topology in Minkowski space.

УДК 699.812:624.014

ОЦІНЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ ПІНОКОКСОВОГО ШАРУ РЕАКТИВНИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИВІВ ДЛЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Копил Б. Я.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій пов'язане з необхідністю обмеження впливу високих температур на несучі елементи під час пожежі. Для цього застосовуються різні способи вогнезахисту, вибір яких залежить від матеріалу конструкції, умов експлуатації, необхідної межі вогнестійкості та властивостей захисного покриття [1,2].

Питання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних, сталевих та дерев'яних конструкцій розглянуто в низці досліджень. Для залізобетонних елементів основна увага приділяється визначенню температурного стану, збереженню несучої здатності та моделюванню нестационарного прогріву [1,3,4]. Для сталевих конструкцій важливим є обґрунтування критичної температури, оскільки підвищення температури призводить до зниження міцності та жорсткості металу [5,6]. Окремі дослідження стосуються вогнезахисту дерев'яних конструкцій з урахуванням особливостей горіння матеріалу та роботи захисного шару [7].

Для металевих будівельних конструкцій поширеним рішенням є реактивні вогнезахисні покриття. Під дією температури вони спучуються та формують пористий теплоізоляційний шар – пінококс, який зменшує інтенсивність нагрівання металу. Ефективність такого покриття визначається не лише кратністю спучення, а й структурною стабільністю сформованого шару, його адгезією до основи та механічною міцністю.

У реальних умовах пожежі пінококс може зазнавати дії потоків гарячих газів, локальних механічних впливів, вібрацій або переміщень елементів конструкції. За таких умов недостатня міцність спученого шару може призводити до його руйнування та відкриття окремих ділянок металеві поверхні. Це обумовлює необхідність кількісного оцінювання механічної стійкості пінококсу як одного з параметрів працездатності реактивного вогнезахисного покриття.

Наявні методи оцінювання міцності пінококсів шару переважно ґрунтуються на локальному ідентуванні або стисканні окремих ділянок. Такі підходи дають змогу визначити опір пробиттю в певній точці, але не

повністю характеризують несучу здатність усієї пористої структури. У зв'язку з цим доцільним є застосування методу розподіленого статичного навантаження, який дозволяє оцінити роботу спученого шару на певній площі.

Для дослідження прийнято стирол-акрилові вогнезахисні покриття для металевих конструкцій із використанням реактивнотдатних компонентів ПФА, ПЕ та $Al(OH)_3$. Зміна їх співвідношення впливає на процес спучення, структуру пінококсу та його опір руйнуванню. Збільшення частки ПЕ сприяє інтенсивнішому спученню, однак може знижувати міцність шару. Введення $Al(OH)_3$ забезпечує формування більш стійкої структури завдяки утворенню оксидного каркасу.

За результатами досліджень визначено співвідношення компонентів ПФА : ПЕ : $Al(OH)_3$ = 25 : 15 : 40 мас. %. Такий склад забезпечує поєднання спучення та структурної стабільності пінококсів шару. Для зазначеної композиції встановлено зниження температури продуктів горіння у 1,6 раза, перехід матеріалу до групи горючості Г1 та групи поширення полум'я П1, а також зменшення димоутворення на 60–65 % до групи Д2. За показниками вогнезахисної ефективності покриття забезпечує межу вогнестійкості R30–R40 при товщині шару 1–2 мм.

Оцінювання механічної міцності пінококсу виконано методом розподіленого навантаження із застосуванням стандартизованих щілинних вантажів. Такий підхід дозволяє визначити здатність спученого шару сприймати зовнішній вплив не в окремій точці, а на ділянці контакту, що краще відображає характер його роботи під час пожежі.

Для уточнення напружено-деформованого стану захисного шару виконано чисельне моделювання в ANSYS Explicit Dynamics. Розрахункова модель включала металеву пластину, вогнезахисний покрив і щілинні вантажі. За результатами моделювання встановлено, що при напруженнях близько 5000 Па та граничній силі 1,57 Н відбувається локальне руйнування пінококсу. Деформації при цьому досягають 19,964 мм, що відповідає втраті несучої здатності спученого шару.

Порівняння пенетраційного методу з методом розподіленого навантаження показало відмінності результатів у межах від 1,14 до 10,68 раза, у середньому – 3,19 раза. Найбільшу розбіжність отримано для складу з ПЕ 10 мас. % та $Al(OH)_3$ 20 мас. %, де коефіцієнт відмінності становив 10,68. Це підтверджує, що локальне інденування характеризує переважно опір пробиттю окремої ділянки, тоді як розподілене навантаження дає змогу оцінити інтегральну несучу здатність пінококсів шару.

Таким чином, механічна міцність пінококсу є одним із параметрів, що визначає працездатність реактивного вогнезахисного покриття для металевих конструкцій. Запропонований підхід із використанням щілинних вантажів і

чисельного моделювання дозволяє кількісно оцінювати стійкість спученого шару до руйнування. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування складу вогнезахисних покривів та удосконалення методів оцінювання їх експлуатаційної придатності.

- [1]. Otrosh Yu. A., Kovalov A. I., Purdenko R. R., Rashkevich N. V., Maiboroda R. I. (2022). Вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки. [Fire resistance of fire-protected reinforced concrete structures for increasing the level of fire safety]. Проблеми надзвичайних ситуацій. № 2(36). С. 102–122 [in Ukrainian].
- [2]. Polupan V. A., Maiboroda R. I., Otrosh Yu. A., Rashkevich N. V. (2022). Критерії вибору способу вогнезахисту будівельних конструкцій. [Criteria for selecting a method of fire protection of building structures]. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Львів, 12–13 жовтня 2022 р. С. 77–79 [in Ukrainian].
- [3]. Otrosh Yu. A., Kovalov A. I., Rashkevich N. V., Taranenko I. S. (2023). Оцінювання вогнестійкості будівлі із вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій. [Assessment of fire resistance of a building with fire-protected reinforced concrete structures]. Комунальне господарство міст. Т. 3, вип. 177. С. 134–141 [in Ukrainian].
- [4]. Kovalov A. I., Purdenko R. R., Otrosh Yu. A., Tomenko V. I., Rashkevich N. V., Yurchenko S. (2022). Моделювання нестационарного прогріву вогнезахисних залізобетонних колон. [Modelling of non-stationary heating of fire-protected reinforced concrete columns]. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. № 2(14). С. 87–98 [in Ukrainian].
- [5]. Kovalov A. I., Otrosh Yu. A., Rashkevich N. V., Rudakov S. V., Tomenko V. I., Yurchenko S. P. (2023). Вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів. [Fire resistance of fire-protected steel structures for increasing the level of fire safety of facilities]. Проблеми надзвичайних ситуацій. № 1(37). С. 282–292 [in Ukrainian].
- [6]. Kovalov A., Tryhub V., Zhurbynskyi D., Rashkevich N., Yurchenko S., Kolomiets D. (2025). Обґрунтування критичної температури сталі для проектування вогнезахисних сталевих конструкцій. [Justification of the critical temperature of steel for the design of fire-protected steel structures]. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. Т. 9, № 1. С. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-2636.2025.9.1.6> [in Ukrainian].
- [7]. Plotnykov I. V., Rashkevich N. V. (2024). Інноваційні заходи вогнезахисту дерев'яних конструкцій. [Innovative fire protection measures for wooden structures]. Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: НУЦЗ України. С. 83–84 [in Ukrainian].

ASSESSMENT OF THE MECHANICAL STRENGTH OF THE CHAR LAYER OF REACTIVE FIRE-PROTECTIVE COATINGS FOR METAL STRUCTURES

The paper considers the assessment of the mechanical strength of the char layer formed by reactive fire-protective coatings for metal structures. The use of a distributed load method is substantiated for determining the integral load-bearing capacity of the intumescent layer. The influence of the coating composition on the structural stability of the char layer and its performance under fire conditions is described.

УДК 624.3

ПРО АНАЛІТИЧНУ МОДЕЛЬ ЗГИНУ ШАРНІРНО ОБПЕРТОЇ ПЛАСТИНИ НА НЕОДНОРІДНІЙ ОСНОВІ

**Крутій Ю.С., д.т.н., проф., Сур'янінов М.Г., д.т.н., проф.,
Перпері А.О., к.т.н., доц., Карнаухова Г.С., к.т.н., доц.,
Бекшаєв О.А., аспірант**

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Задачі згину тонких пластин, що взаємодіють із деформівною основою, належать до класичних задач будівельної механіки та теорії пружності і мають важливе значення при проектуванні інженерних конструкцій. Для опису реакції основи широко застосовується модель Вінклера, яка встановлює локальну залежність між осіданням та реакцією основи і є ефективною при інженерних розрахунках.

Відомі аналітичні розв'язки задач згину прямокутних пластин на пружній основі отримані переважно для випадку сталого коефіцієнта постелі. Разом з тим у реальних умовах жорсткісні характеристики основи є неоднорідними і змінюються в плані внаслідок природної мінливості ґрунтів, їх шаруватої будови, нерівномірного ущільнення або локального підсилення. У цьому випадку коефіцієнт постелі набуває змінного характеру, що суттєво впливає на математичну постановку задачі: його залежність від координат порушує ортогональність базисних функцій у класичних розкладах і ускладнює побудову аналітичного розв'язку традиційними методами. За таких умов переважно застосовуються чисельні підходи, які забезпечують можливість розв'язання задач загального вигляду, однак не дозволяють у

явній формі простежити вплив закону зміни коефіцієнта постелі на напружено-деформований стан пластини та обмежують можливості теоретичного узагальнення результатів. Тому розробка аналітичних моделей згину прямокутних пластин на неоднорідній пружній основі Вінклера, що забезпечують подання розв'язку у функціональній формі та дозволяють безпосередньо враховувати змінність коефіцієнта постелі, є актуальною як з теоретичної, так і з практичної точки зору.

Авторами досліджено задачу про згин шарнірно обпертої прямокутної пластини ($0 \leq x \leq a$; $0 \leq y \leq b$) сталієї циліндричної жорсткості D , що знаходиться під впливом неперервно-змінного поперечного навантаження $q(x, y)$ та взаємодіє з двовимірною неоднорідною суцільною пружною основою Вінклера (рис.1.).

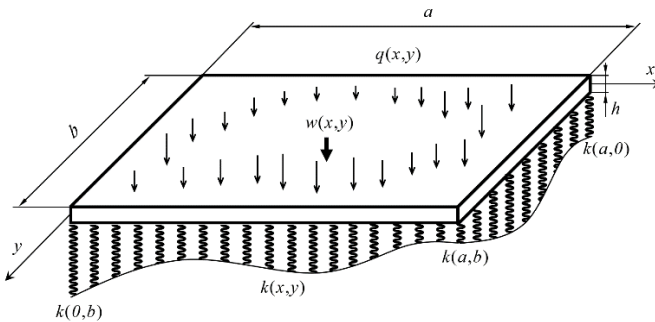


Рис. 1. Розрахункова схема пластини на неоднорідній пружній основі

Неоднорідність основи характеризується коефіцієнтом постелі, який в загальному випадку може задаватись довільною неперервною функцією двох координат $k(x, y) = k_0 B(x, y)$.

Запропоновано аналітичну модель згину пластини, яка забезпечує подання розв'язку у вигляді потрійного ряду

$$w(x, y) = \sqrt{ab} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^k \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{k,n,m} \sin \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b},$$

де $K = k_0(ab)^2/D$ – відомий безрозмірний параметр. Для визначення коефіцієнтів даного ряду отримані рекурентні співвідношення.

Після визначення функції прогинів, легко отримати кінцеві розрахункові формули для інших параметрів напружено-деформованого стану пластини. Зокрема, для згинальних моментів матимемо

$$M_x = D\sqrt{ab} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^k \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{k,n,m} \left(\left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 + \mu \left(\frac{m\pi}{b} \right)^2 \right) \sin \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b},$$

$$M_y = D\sqrt{ab} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^k \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{k,n,m} \left(\mu \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b} \right)^2 \right) \sin \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b}.$$

Авторами розглянуто декілька прикладів двовимірної неоднорідності пружних основ, серед яких лінійно, степеневу та експоненціально змінні. Отримані чисельні значення прогинів та моментів порівнюються з відповідними значеннями, отриманими в програмному комплексі ANSYS. Порівняльний аналіз засвідчив валідність запропонованої авторської моделі.

ANALYTICAL MODEL OF BENDING OF A SIMPLY SUPPORTED PLATE ON A NON-UNIFORM FOUNDATION

Formulas for an analytical model of the bending of a rectangular simply supported plate on a non-uniform Winkler elastic foundation are presented.

УДК 614.841:624.012.45:614.839

СТІЙКІСТЬ МОНОЛІТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ ЗА УМОВ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ ПОЖЕЖІ ТА ДЕФЛАГРАЦІЙНОГО ВИБУХУ

Майборода Р.І., д.ф.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

В умовах воєнних дій на території України будівлі та споруди можуть зазнавати аварійних впливів, пов'язаних із пожежею, вибухом, локальним пошкодженням несучих конструкцій або їх комбінованою дією. Для монолітних залізобетонних будівель виробничого призначення характер таких впливів додатково визначається можливістю розміщення вибухопожежонебезпечних технологічних процесів. У зв'язку з цим розрахункове оцінювання роботи конструктивної системи за аварійних сценаріїв є складовою визначення її стійкості до прогресуючого обвалення.

Локальне пошкодження окремих несучих елементів призводить до зміни схеми передавання навантажень у будівлі. Це супроводжується

перерозподілом внутрішніх зусиль між суміжними елементами, а за певних умов – поширенням пошкоджень на інші частини конструктивної системи. Підходи до оцінювання цього виду руйнування наведено у працях, присвячених методикам розрахунку прогресуючого обвалення та конструктивним заходам щодо обмеження його наслідків [1,2].

Прогресуюче обвалення розглядається як процес поширення руйнування після локального пошкодження одного або кількох несучих елементів. Для монолітних залізобетонних будівель це передбачає врахування роботи колон, плит перекриття, вузлів їх сполучення, умов закріплення, характеристик бетону й арматури, а також характеру передавання навантажень між елементами. За потреби розрахункова модель може доповнюватися урахуванням взаємодії системи «грунт–фундамент–будівля» [3].

Для опису роботи конструкцій прийнято математичну модель, у якій враховано температурний вплив пожежі, зміну теплофізичних і міцнісних характеристик бетону та арматури, деформування конструкцій і дію вибухового навантаження [4,5]. Вихідними параметрами моделі є геометричні характеристики конструкцій, клас бетону, характеристики арматури, схема армування, умови закріплення, постійні та тимчасові навантаження, температурний режим пожежі й параметри вибухового впливу.

Розрахунок роботи конструкцій за умов пожежі виконується через послідовне розв'язання теплотехнічної та міцнісної задач. У теплотехнічній задачі визначається розподіл температури в перерізах залізобетонних елементів. У міцнісній задачі ці температурні поля використовуються для коригування характеристик бетону та арматури, після чого визначається напружено-деформований стан конструкцій [4]. Така послідовність дає змогу врахувати нерівномірне нагрівання перерізів, температурні деформації та зміну роботи елементів після теплового впливу.

Вибухове навантаження задається як короткочасний динамічний вплив. У розрахунковій постановці враховуються величина надлишкового тиску, зона прикладання навантаження та момент його дії відносно розвитку пожежі. Для виробничих будівель така постановка пов'язана з можливістю виникнення дефлаграційних процесів у приміщеннях. Питання врахування вибухового впливу та параметрів конструктивного захисту розглянуто у працях [6,1].

Достовірність прийнятого розрахункового підходу перевірено шляхом зіставлення результатів чисельного моделювання з даними натурних експериментів. Для теплотехнічної та міцнісної частин моделі використано результати вогневих випробувань монолітних залізобетонних плит перекриття. Похибка визначення температурних полів не перевищувала 2,6 %, а похибка визначення прогинів становила не більше 10 % [4,5].

Модель роботи залізобетонної конструкції за дії вибухового навантаження перевірено за даними експерименту, у якому залізобетонна плита зазнавала дії вибуху масою 8 кг у тротиловому еквіваленті на відстані 3 м. Різниця між експериментальними та розрахунковими значеннями максимальних переміщень перебувала в межах 10 % [5].

На основі перевіреної моделі сформовано методику оцінювання стійкості монолітних залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення. Методика передбачає створення просторової розрахункової моделі будівлі, задання типів жорсткості елементів, характеристик матеріалів, армування, постійних і тимчасових навантажень, температурного впливу пожежі та вибухового навантаження. Після цього визначається напружено-деформований стан конструктивної системи та оцінюється можливість розвитку прогресуючого обвалення [7,8].

Практичну реалізацію методики виконано у програмному комплексі ЛПА-САПР на прикладі шестиповерхової виробничої будівлі з монолітним залізобетонним каркасом. У моделі враховано колони, плити перекриття, просторову роботу каркаса, характеристики бетону та арматури, типи жорсткості елементів, а також діючі постійні й тимчасові навантаження [7].

У розрахунковому сценарії вплив пожежі враховано шляхом зниження міцнісних характеристик матеріалів залежно від температури. Тривалість пожежі прийнято 60 хв. Для конструкцій, які зазнавали теплового впливу, задано змінені характеристики бетону та арматури. Вибухове навантаження прийнято рівним 15 кПа та прикладено на 60-й хвилині розрахунку після врахування впливу пожежі на матеріали конструкцій [8].

За результатами чисельного моделювання встановлено, що за нормальних умов експлуатації прогин плит перекриття становив до 6,5 мм. Після пожежі тривалістю 60 хв цей показник становив 17 мм. За умов подальшої дії вибухового навантаження прогин нижньої плити досяг 55,8 мм, а для верхньої плити зафіксовано зворотний вигин величиною 14,4 мм. За прийнятих параметрів розрахунку руйнування конструкцій не встановлено, що свідчить про збереження стійкості конструктивної системи до прогресуючого обвалення в межах розглянутого сценарію [7, 8].

Для уточнення впливу конструктивних рішень розглянуто варіанти шестиповерхової виробничої будівлі з різними перерізами конструкцій і різним рівнем підсилення. За результатами розрахунків встановлено, що підсилення перекриття вартістю 148 тис. грн забезпечує роботу будівлі з локальними пошкодженнями до 1 %. Для інших варіантів отримано економію вартості будівництва в межах 100–400 тис. грн, однак за умов послідовної дії пожежі та вибуху для них розрахунково визначено розвиток прогресуючого обвалення з обсягом руйнувань від 6 до 43 % [1,8].

Таким чином, розроблений підхід забезпечує оцінювання стійкості монолітних залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення за умов комбінованої дії пожежі та дефлаграційного вибуху. Його застосування передбачає врахування температурного впливу на бетон і арматуру, зміни напружено-деформованого стану конструкцій, параметрів вибухового навантаження та просторової роботи конструктивної системи будівлі. Отримані результати дають змогу визначати характер зміни роботи несучих елементів за аварійного сценарію та обґрунтовувати конструктивні рішення, спрямовані на обмеження розвитку прогресуючого обвалення.

- [1]. Maiboroda R., Zhuravskij M., Otrosh Y., Karpuntsov V. Determination of the Required Area of Easily Removable Structures to Protect against Progressive Collapse. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 1004. P. 73–83. doi: <https://doi.org/10.4028/p-v0xa6h> [in English].
- [2]. Отрош Ю. А., Майборода Р. І., Ромін А. В. Дослідження методик розрахунку прогресуючого обвалення [Research of methods for calculating progressive collapse]. *Механіка та математичні методи*. 2023. Т. 5, № 2. С. 25–40. URL: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40> [in Ukrainian].
- [3]. Purdenko R., Maiboroda R., Rashkevich N., Otrosh Y. Development of a Numerical Model of the «Soil–Foundation–Building» System. *Applied Mechanics and Materials*. 2024. Vol. 924. P. 191–199. doi: <https://doi.org/10.4028/p-5oeggb> [in English].
- [4]. Майборода Р. І., Отрош Ю. А. Удосконалення математичної моделі теплопередачі системи «залізобетонна колона–перекриття» [Improvement of the mathematical model of heat transfer in the “reinforced concrete column–slab” system]. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 1(19). С. 97–108. URL: [https://doi.org/10.33269/nvz.2025.1.\(19\).97-108](https://doi.org/10.33269/nvz.2025.1.(19).97-108) [in Ukrainian].
- [5]. Maiboroda R., Otroch Yu. Improved Thermomechanical Model for Predicting the Behaviour of Reinforced Concrete Structures under Fire and Explosion Conditions. *Mechanics and Mathematical Methods*. 2025. Vol. VII, No. 2. P. 66–85. URL: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2025-7-2-66-85> [in English].
- [6]. Skob Y., Dreval Y., Vasilchenko A., Maiboroda R. Selection of Material and Thickness of the Protective Wall in the Conditions of a Hydrogen Explosion of Various Power. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 952. P. 121–129. doi: <https://doi.org/10.4028/p-ST1VeT> [in English].
- [7]. Майборода Р. І., Отрош Ю. А. Програмна реалізація оцінювання стійкості будівель до прогресуючого обвалення [Software implementation of assessing the resistance of buildings to progressive collapse]. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2025. № 1(41). С. 177–193. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25353> [in Ukrainian].
- [8]. Майборода Р., Отрош Ю. Дослідження методики розрахунку стійкості до прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху [Research of the methodology for calculating building resistance to progressive collapse caused by fire and explosion]. *Комунальне господарство міст*. 2025. № 3(191). С. 485–495. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-485-495> [in Ukrainian].

RESISTANCE OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE BUILDINGS TO PROGRESSIVE COLLAPSE UNDER THE COMBINED ACTION OF FIRE AND DEFLAGRATION EXPLOSION

Progressive collapse resistance is considered for monolithic reinforced concrete buildings subjected to accidental actions. Fire exposure and deflagration explosion affect the load-bearing capacity and stress-strain state of structural elements. This study examines the behaviour of monolithic reinforced concrete buildings under the combined action of fire and deflagration explosion. The calculation takes into account temperature-dependent properties of concrete and reinforcement, structural deformations, blast loading parameters, and changes in the structural system during accidental loading.

УДК 539.3

ОПТИЧНА ДІАГНОСТИКА ДЕФОРМАЦІЙ ПІНОБЕТОНУ МЕТОДОМ СТРУКТУРНО-АДАПТИВНОЇ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Мартинюк Н. О., аспірант, Мікуліч О. А., д.т.н., проф.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

Вступ. Пінобетон є важливою складовою сучасної будівельної інфраструктури завдяки високим теплоізоляційним характеристикам при відносно малій вазі конструкцій [1]. Водночас матеріал має виражено гетерогенну макроструктуру, утворену хаотично розподіленими мікро- та макропорами, що формують складні просторово мінливі поля деформацій. Під дією навантажень кожна окрема пора діє як локальний концентратор напружень, поблизу якого ініціюється мікротріщиноутворення. Тому своєчасна та точна діагностика зон концентрації деформацій є ключовим завданням неруйнівного контролю пористих бетонів [2].

Аналіз літератури. Метод цифрової кореляції зображень (DIC) є одним із найпотужніших оптичних інструментів безконтактного вимірювання полів переміщень і деформацій [3]. Класичні алгоритми оптичного потоку, зокрема алгоритм Фарнебека, ефективно подавляють інструментальний шум за рахунок глобального просторового згладжування. Проте на гетерогенних поверхнях точність методу різко знижується: обчислювальне вікно перетинає границі пор та тріщин і «перетягує» неіснуючі деформації через порожній простір. Для подолання цього обмеження запропоновано структурно-адаптивні алгоритми (SA-DIC), які обмежують згладжування виключно в межах суцільних матеріальних доменів [4].

Мета та задачі. Метою роботи є підвищення точності оптичної діагностики деформованого стану пінобетону на базі реального фізичного експерименту. Поставлено задачі: 1) адаптувати архітектуру SA-DIC з бінарним маскуванням для обробки кінематики пінобетонної матриці; 2) провести експеримент з одновісного стиснення зразка пінобетону з високороздільною відеофіксацією; 3) виконати кількісний порівняльний аналіз похибок класичного методу Фарнебека та запропонованого методу SA-DIC за допомогою тесту нульової деформації та під час активного руйнування.

Методика і результати. Зразок пінобетону марки D500 розмірами 42×47×23 мм піддавали одновісному стисненню на гідравлічному пресі потужністю 40 кН. Процес деформування фіксували відеокамерою у роздільній здатності 4K (2160×3840 пікселів) при 60 кадрах на секунду. Алгоритм SA-DIC реалізовано на базі оптичного потоку Фарнебека з параметрами: розмір обчислювального вікна — 35 пікселів, 4 рівні піраміди, 5 ітерацій уточнення. Структурно-адаптивне згладжування виконано з ядром 21×21 пікселів протягом 10 ітерацій; бінарну маску структурних розривів побудовано за градієнтним аналізом поля переміщень із пороговим значенням на рівні 93-го перцентиля та подальшою морфологічною обробкою.

Для оцінки базового інструментального шуму застосовано тест нульової деформації (Zero-Strain Test): порівнювали два кадри зразка до моменту контакту з пресом (кадри №100 та №150), тому будь-які розраховані переміщення вважали інструментальним шумом. Узагальнені результати тесту та активного стиснення наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння точності алгоритмів (Zero-Strain Test та активне стиснення)

Метод	MAE шуму, px	$ e_{yy} $ у тілі
Фарнебек (стандартний)	0,036	0,0350
SA-DIC (запропонований)	0,029 (-19,3 %)	0,0262 (-25,1 %)

Під час активної стадії стиснення (кадри №516–№2929) стандартний метод Фарнебека через велике вікно усереднення «розмазував» високі градієнти деформацій з тріщин на сусідні суцільні блоки пінобетону, генеруючи фіктивні деформації порядку 3–5 %, що фізично неможливо для крихкого матеріалу з граничною деформацією руйнування близько 0,2–0,3 %. Алгоритм SA-DIC успішно виявив межі розривів і заблокував усереднення через них, унаслідок чого рівень розрахованих деформацій у суцільних незруйнованих блоках зменшився на 25,1 % порівняно зі стандартним алгоритмом.

Аналіз чутливості показав, що алгоритм є робастним у широкому діапазоні параметрів: при мінімальних налаштуваннях (ядро 7×7 , 3 ітерації) покращення складає 20,8 %, а при збільшених параметрах (ядро 31×31 , 20 ітерацій) — 32,4 %, що підтверджує стійкість запропонованого підходу та відсутність критичної залежності від конкретного набору параметрів.

Висновки. 1. Архітектуру структурно-адаптивної цифрової кореляції зображень (SA-DIC) валідовано на реальних експериментальних даних процесу стиснення зразка пінобетону марки D500. 2. Тест нульової деформації на стаціонарних кадрах довів, що запропонований алгоритм ефективніше фільтрує інструментальний шум камери, знижуючи базову похибку вимірювання на 19,3 %. 3. Під час розкриття макротріщин SA-DIC блокує штучне розмазування градієнтів, що дозволило знизити рівень фіктивних деформацій у суцільних незруйнованих блоках матриці на 25,1 % порівняно з класичним алгоритмом Фарнебека. 4. Аналіз чутливості підтвердив робастність методу у всьому досліджуваному діапазоні параметрів (від 20,8 % до 32,4 %).

1. Zhang L., Wang X., Liu J. Fracture behavior of foam concrete under uniaxial compression evaluated by digital image correlation. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 292. 123432. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123432.
2. Li W., Zhou S., Zhang T. Non-destructive evaluation of porous building materials: a critical review. *NDT & E International*. 2022. Vol. 130. 102685. DOI: 10.1016/j.ndteint.2022.102685.
3. Hild F., Roux S. Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties — a review. *Strain*. 2022. Vol. 42, № 2. P. 69–80. DOI: 10.1111/str.12260.
4. Roux S., Réthoré J., Hild F. Next-generation digital image correlation techniques for heterogeneous microstructure analysis. *Mechanics of Materials*. 2023. Vol. 180. 104638. DOI: 10.1016/j.mechmat.2023.104638.

OPTICAL DIAGNOSTICS OF FOAM CONCRETE DEFORMATIONS BY STRUCTURE-ADAPTIVE DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD

The paper presents a structure-adaptive digital image correlation (SA-DIC) framework tailored for kinematic analysis of highly porous foam concrete. The pipeline uses a binary mask of structural discontinuities that prevents the averaging window from crossing pore and crack boundaries, thus preserving physically authentic strain jumps. The method was verified through uniaxial compression of a D500 foam concrete specimen ($42 \times 47 \times 23$ mm) recorded in 4K resolution at 60 fps. The Zero-Strain Test demonstrated a 19.3 % reduction of the instrumental noise floor; during active crack opening the level of fictitious strains within the intact solid blocks was reduced by 25.1 % compared with the standard Farneback algorithm. Sensitivity analysis confirmed the robustness of the proposed approach across a wide range of parameters (20.8 %–32.4 % improvement).

УДК 624:04

ПРОГИНИ СТАЛЕФІБРОБЕТОННИХ ТА БЕТОННИХ ОБОЛОНОК ОДНАКОВОЇ ТОВЩИНИ НА ПОЧАТКУ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ

Сур'янінов М.Г., Метлицький В.В.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

За останні десятиліття помітно зросло застосування нових композитних матеріалів. Таким матеріалом у будівництві є фібробетон. Фібробетон має більш високі деформаційні й міцнісні характеристики в порівнянні зі звичайним бетоном. Ці характеристики дозволяють використовувати фібробетон у конструкціях які експлуатуються в складних умовах — тунелях, мостах, аеродромних покриттях, морських спорудах і ін.

Оболонкові конструкції з бетону широко застосовуються у сучасному будівництві завдяки їхній високій несучій здатності, просторовій роботі та ефективному використанню матеріалу. До таких конструкцій належать покриття промислових і цивільних будівель, резервуари, купольні та циліндричні оболонки. Одним з основних критеріїв працездатності оболонок є їхня деформативність, зокрема прогини, які безпосередньо пов'язані з жорсткістю та тріщиностійкістю матеріалу.

Звичайний бетон має обмежену міцність при розтягу, що зумовлює раннє утворення тріщин і, відповідно, зростання прогинів. Застосування сталеві фібри дозволяє підвищити розтягувальну міцність і тріщиностійкість бетону, що особливо важливо для тонкостінних оболонкових конструкцій[1]. У зв'язку з цим актуальним є порівняльний аналіз прогинів бетонних і сталеві фібробетонних оболонок однакової товщини на стадії початку тріщиноутворення.

На початку навантаження сталеві фібробетонна оболонка, як і звичайна бетонна, працює в пружному режимі. Проте завдяки наявності фібри розтягувальні напруження сприймаються не лише бетонною матрицею, а й сталевими волокнами [2]. Це призводить до підвищення ефективної розтягувальної міцності матеріалу та до затримки моменту утворення перших тріщин. У результаті оболонка довше зберігає суцільність перерізу та більшу жорсткість.

Нами проведені експериментальні дослідження, у ході яких порівнювалася робота оболонок однакової товщини на початку тріщиноутворення.

Відповідно до програми випробувань оболонок виготовлено 4 моделі циліндричної оболонки із залізобетону (зразки RC1-RC4) та 4 моделі із фібробетону (зразки FRC1-FRC4). Всі зразки мали постійну довжину $L=2450$ мм та радіус поперечного перерізу $R=270$ мм, а варіювалися товщина оболонки δ та розміри поперечного перерізу бортових елементів b , h . Товщина зразків становила 45, 50, 55, 60 мм.

Розподілене вертикальне навантаження прикладено по чотирьох смуга, шириною 13 см кожна. Оболонка шарнірно спирається з кутів на пластини 100×100 мм.

В експериментах використана сталева фібра із загнутими кінцями, що випускається ЧАО "ПО" Стальканат-Силур" відповідно до Європейського стандарту EN 14889-1: 2006. Фібра виготовляється із дроту з тимчасовим опором 1150 МПа (1 клас), 1335 МПа (2 клас) і 1550 МПа (3 клас).

Світовий досвід практичного застосування свідчить про те, що фібра із загнутими кінцями практично не утворює "їжаків", що дозволяє добитися її рівномірного розподілу за обсягом. У проведених дослідженнях використана фібра 2 класу з діаметром 1 мм.

З метою зіставлення властивостей бетону й сталеві фібробетону всі види випробувань проводилися на зразках, виготовлених з обох матеріалів.

Таблиця 1

Навантаження та прогини на початку тріщиноутворення

Оболонка	Навантаження (кН)	Прогини (мм)
RC1	42,9	1,2
RC2	64,5	0,92
RC3	64,5	0,98
RC4	53,6	3,12
FRC1	64,3	1,17
FRC2	74,9	1,2
FRC3	80,6	2,67
FRC4	104,8	3,42

Експериментальні дані показують, що:

для бетонних і сталеві фібробетонних оболонок однакової товщини, геометрії та умов навантаження прогини на стадії початку тріщино утворення бетонні оболонки досягають стану тріщиноутворення при менших навантаженнях;

різниця в прогинах ще не максимальна, але вона чітко проявляється і зростає після утворення тріщин.

Застосування сталеві фібробетону дозволяє збільшити величину навантаження приблизно на 35–45 %.

Використання сталевібробетону є ефективним шляхом підвищення жорсткості та тріщиностійкості оболонкових конструкцій.

У результаті оболонка зі сталевібробетону довше зберігає суцільність перерізу та більшу жорсткість порівняно зі звичайною бетонною оболонкою тієї ж товщини.

Таким чином, аналіз прогинів бетонних і сталевібробетонних оболонок однакової товщини на початку тріщиноутворення показує очевидні переваги сталевібробетону.

Його використання дозволяє зменшити деформативність конструкцій, підвищити їхню надійність і забезпечити більш стабільну роботу на початкових стадіях навантаження. У сучасному будівництві сталевібробетонні оболонки можуть розглядатися як перспективна альтернатива традиційним бетонним конструкціям, особливо у випадках, коли вирішальне значення мають прогини та тріщиностійкість.

[1]. Лисенко В. М., Пархоменко О. А. Сталевібробетонні конструкції: властивості та розрахунок. – Київ : КНУБА, 2014. – 156 с.

[2]. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011.

DEFORMATIONS OF STEEL-FIBER-REINFORCED CONCRETE AND CONCRETE SHELLS OF THE SAME THICKNESS AT THE BEGINNING OF CRACK FORMATION

Comparative analysis of deflections of concrete and steel fiber reinforced concrete shells of the same thickness at the stage of crack initiation. Four models of cylindrical shells made of reinforced concrete and four models made of fiber reinforced concrete were manufactured. All samples had a constant length and cross-sectional radius, while the shell thickness and cross-sectional dimensions of the side elements varied. The thickness of the samples was 45, 50, 55, and 60 mm. A comparative analysis of the experimental results was performed. The maximum discrepancy in deflections was determined.

УДК 621.924.9

ЗМІНА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ БЕТОННИХ І ФІБРОБЕТОННИХ ОБОЛОНОК ПРИ ЗМІНІ ЇХ ТОВЩИНИ

Сур'янінов М.Г., д.т.н., проф., Метлицький В.В. д.ф.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Тонкостінні оболонки є одними з найбільш ефективних архітектурних форм завдяки їх здатності перекивати великі прольоти при мінімальній витраті матеріалів. Проте, ключовим фактором, що визначає їхню надійність, є товщина перерізу. У сучасній практиці будівництва спостерігається перехід від традиційного залізобетону до сталевібробетону, що зумовлено необхідністю зниження власної ваги конструкцій та підвищення їхньої тріщиностійкості.

Зміна товщини впливає на конструкцію нелінійно, оскільки вона одночасно змінює власну вагу, жорсткість на вигин та опір стисканню.

При проектуванні бетонних оболонок зміна товщини має суворі технологічні та конструктивні обмеження. Мінімальна товщина бетонної оболонки обмежена необхідністю забезпечення захисного шару бетону для арматурних сіток. Це призводить до того, що конструкція часто стає «переваженою». Чим менша товщина бетонної оболонки, тим вища її чутливість до випадкових ексцентриситетів. При малих h будь-яке відхилення від проектної осі створює згинальний момент, який бетон без фібри не здатний ефективно перерозподілити. У звичайному бетоні при досягненні критичного навантаження руйнування відбувається миттєво. Збільшення товщини лише відтерміновує цей момент, але не змінює характер руйнування [1].

Сталевібробетон демонструє якісно іншу реакцію на зміну товщини. Основною відмінністю є робота матеріалу після появи першої тріщини. У сталевібробетоні міцність на розтяг при згині значно вища. Це дозволяє оболонці витримувати моменти, що виникають при зменшенні товщини, без ризику раптового колапсу. Сталевібробетон має властивість «псевдопластичності». При зменшенні товщини конструкція стає більш гнучкою, але за рахунок фібри вона зберігає здатність до перерозподілу зусиль між перенапруженими ділянками. Якщо для бетону діаграма (навантаження-прогин) обривається піково, то для сталевібробетону вона має пологий спадний (або висхідний) характер, що дає запас часу перед руйнуванням [2].

Для проведення основних випробувань було спроектовано та виготовлено спеціальний стенд (рис. 1).

Відповідно до програми випробувань оболонок виготовлено 4 моделі циліндричної оболонки із залізобетону (зразки RC1-RC4) та 4 моделі із фібробетону (зразки FRC1-FRC4). Всі зразки мали постійну довжину 2450 мм та радіус поперечного перерізу 270 мм, а варіювалися товщина оболонки та розміри поперечного перерізу бортових елементів. Товщина зразків становила 45, 50, 55, 60 мм.

Розподілене вертикальне навантаження прикладено по чотирьох смугах, шириною 13 см кожна. Оболонка шарнірно спирається з кутів на пластини 100x100мм.

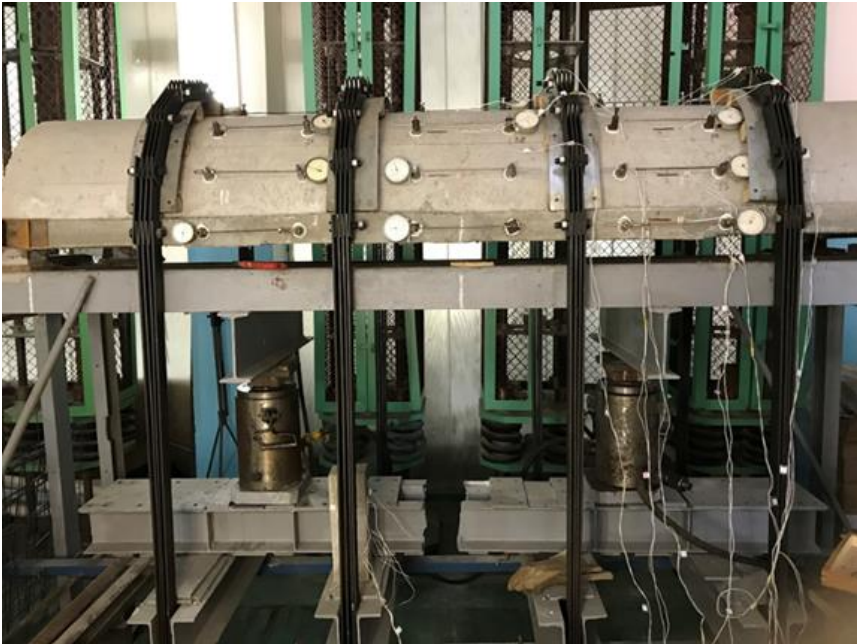


Рис. 1. Випробувальний стенд

Зміна товщини в бетонних оболонках обмежена жорсткими рамками стійкості та нормами армування. Екстенсивне збільшення товщини є малоєфективним через ріст маси.

Несуча здатність бетонних оболонок, збільшилась з 96,4 кН до 117,9 кН, тобто на 19% а у сталеві фібробетонних відповідно несуча здатність підвищилась з 128,6 кН до 182,2 кН, тобто на 42%.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

Модель	Товщина, мм	Несуча здатність, кН
RC1	45	96,4
RC2	50	101,6
RC3	55	109,6
RC4	60	117,9
FRC1	45	128,6
FRC2	50	149,9
FRC3	55	167,6
FRC4	60	182,2

Порівняння показує, що товщина оболонки є критичним параметром для обох типів матеріалів, однак ступінь її впливу різний. Бетонні оболонки характеризуються високою чутливістю до зменшення товщини, тоді як фібробетон дозволяє зберігати необхідну несучу здатність навіть при тонкостінному виконанні.

Зі зменшенням товщини фібробетонної оболонки несуча здатність також зменшується, проте цей процес має менш інтенсивний характер. Фібра забезпечує стримування розвитку мікро- та макротріщин, що дозволяє оболонці зберігати працездатність навіть після перевищення розтягувальної міцності бетонної матриці.

Використання фібробетону є доцільним для тонкостінних оболонкових конструкцій.

Оптимізація товщини з урахуванням властивостей матеріалу дозволяє підвищити ефективність оболонкових систем.

Збільшення товщини бетонної оболонки ефективно лише до певної межі, поки зростання власної ваги не починає нівелювати приріст міцності.

Сталефібробетон дозволяє проектувати оболонки меншої товщини з вищою експлуатаційною надійністю.

Збільшення товщини у звичайному бетоні — це екстенсивний шлях, який веде до перевантаження конструкції власною вагою. У сталефібробетоні зміна товщини дозволяє маневрувати.

Фактично, сталеві фібробетон дозволяє створювати оболонки, де "працює" кожен міліметр товщини, тоді як у звичайному бетоні значна частина перерізу може залишатися баластом.

[1]. Карпюк В. М., Костюк О. І., Сорохманюк В. В. Опір залізобетонних та сталеві фібробетонних елементів і конструкцій. — Одеса: *ВМВ*, 2015. — 450 с.

[2]. Семко О. В., Фесенко О. А. Вплив дисперсного армування на стійкість та несучу здатність тонкостінних оболонок. *Збірник наукових праць ПолтНТУ (Серія: Галузеве машинобудування, будівництво)*. Полтава, 2018.

CHANGE IN THE BEARING CAPACITY OF CONCRETE AND FIBERCONCRETE SHELLS WHEN THEIR THICKNESS CHANGES

A comparative analysis of changes in the load-bearing capacity of concrete and fiber-reinforced concrete shells as their thickness varies. Four models of cylindrical reinforced concrete shells and four models of fiber-reinforced concrete shells were fabricated. All specimens had a constant length and cross-sectional radius, while the shell thickness and the dimensions of the cross-section of the side elements varied. The thickness of the specimens was 45, 50, 55, and 60 mm. A comparative analysis of the experimental results was conducted. The maximum percentage difference in load-bearing capacity between concrete and fiber-reinforced concrete shells of different thicknesses was determined.

УДК 621.763:621.762.224:621.791.72

FATIGUE ENDURANCE OF PARTS OBTAINED BY SELECTIVE LASER FUSION OF NICKEL ALLOY POWDERS

Naumyk V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Pavlenko D.V., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Kaganovsky O.D.

Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia

Pedash O.O., Candidate of Technical Sciences

JSC "Motor Sich", Zaporizhzhia

In this work, a comparative study of the fatigue performance of samples of Inconel 718 alloy obtained by selective laser melting with the performance of the material obtained by traditional methods (hot deformation) was performed to study

the prospects for the practical application of powder materials in the manufacture of parts. In the manufacture of samples, powders obtained by the technologies of vacuum gas atomization of the melt and centrifugal plasma rotation of the metal workpiece were used. In the course of the research, multi- and low-cycle fatigue tests were performed. Accordingly, the endurance and limited endurance limits for a given level of durability were determined.

To determine the endurance limit, tests were carried out in accordance with the ASTM E466 standard based on 20 million cycles by the method of dynamic excitation of vibrations in smooth cylindrical samples with a working part diameter of 6 mm on an electrodynamic vibration stand VEDS-200 in resonant mode.

Low-cycle fatigue tests of samples were performed according to the ASTM E606 standard at temperatures of 20°C and 550°C, $\nu=1\text{Hz}$, $R\sigma=0$ on a universal servo-hydraulic testing machine Instron 8862. According to the obtained results, curves in logarithmic coordinates “Stress amplitude σ – Number of cycles N_c ” were constructed, which allowed to determine with sufficient reliability ($R^2>0.9$) the limit of limited endurance for a given level of durability (1×10^3 , 5×10^3 , 5×10^4 cycles to failure). All samples were subjected to standard heat treatment for the Inconel 718 alloy. Samples from powder materials were additionally subjected to hot isostatic pressing before heat treatment.

The results of multi-cycle fatigue tests of a series of standard samples of experimental variants showed that powder materials provided an endurance limit of 333 MPa, while samples made of deformed material showed indicators of 353 MPa. In this case, the results can be accepted as comparable due to a small difference in the endurance limit indicators. It should be noted that to improve the level of the endurance limit of powder materials, it is possible to use technological operations to improve the surface condition of the samples, since during fatigue tests their destruction can be initiated by surface defects. In this case, the authors may propose to improve the surface condition of the samples by using such technological operations as diamond smoothing of the working part of the samples, or, for example, their ultrasonic hardening. For this, it is necessary to conduct a separate series of studies and tests with the selection of rational technological parameters of the processes.

According to the experimental data obtained during low-cycle fatigue tests, curves in semi-logarithmic coordinates “Stress amplitude σ – Number of cycles N_c ” were constructed, which demonstrated that under the conditions of testing standard samples at 20°C on bases of 1×10^3 and 5×10^3 cycles, higher indicators are demonstrated by powder materials. It should be noted that an increase in the amplitude of stresses applied to the samples leads to a decrease in the difference in durability between deformed and powder materials, and at a certain (1275 MPa) stress level, samples from powders manufactured using centrifugal plasma technology are characterized by approximately the same durability test results

compared to deformed ones, and in samples obtained from gas atomization powders, the results obtained significantly exceed those obtained in the deformed material.

A further increase in the test bases to 5×10^4 shows that the deformed material provides higher indicators.

Increasing the test temperature to 550°C showed that samples obtained from gas atomization powders in the entire experimental interval of stress amplitudes demonstrate results comparable to the deformed material. Calculations showed a small difference (within 10-12%) in the indicators obtained on standard samples between all experimental variants.

Thus, the results of multi-cycle and low-cycle fatigue tests demonstrate that powder materials are able to provide durability at the level of deformed material obtained by traditional manufacturing technology.

ВТОМНА ВИТРИВАЛІСТЬ ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ СЕЛЕКТИВНИМ ЛАЗЕРНИМ СПЛАВЛЕННЯМ ПОРОШКІВ НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ

Виконано порівняльне дослідження показників втомних зразків зі сплаву Inconel 718, отриманих селективним лазерним сплавленням з показниками матеріалу, отриманого традиційними методами (гарячою деформацією).

За результатами випробувань на багаточислову та малоциклову втому встановлено, що порошкові матеріали здатні забезпечувати довговічність деталей на рівні деформованого матеріалу отриманого за традиційною технологією виготовлення.

УДК 621.311:614.841

ПІДХОДИ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ

Отрош Ю.А., д.т.н., проф., Ломакін В.В., Сіпко О.В.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Енергооб'єкти належать до елементів критичної інфраструктури, стабільна робота яких впливає на функціонування систем життєзабезпечення, промисловості, транспорту, зв'язку та комунального господарства. В умовах ракетно-артилерійських уражень, атак ударними безпілотними літальними апаратами та пошкодження інженерних мереж фізичний захист енергетичних об'єктів є складовою забезпечення їх стійкості.

У роботі [1] розглянуто сучасний стан попередження надзвичайних ситуацій на територіях України, які зазнали ракетно-артилерійських уражень. У дослідженні охарактеризовано нові умови виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язані з пошкодженням об'єктів інфраструктури, інженерних мереж, будівель і споруд. Наведений підхід передбачає врахування прямого ураження та вторинних наслідків, що виникають після пошкодження об'єкта.

Питання стійкості систем життєзабезпечення розглянуто у праці [2]. Енергетичні об'єкти у цьому контексті є частиною системи забезпечення населення та територій ресурсами. Порушення їх роботи впливає на водопостачання, тепlopостачання, зв'язок, роботу медичних установ, транспортної інфраструктури та аварійних служб.

У роботі [3] досліджено оцінку надійності будівельних конструкцій під впливом вибухових навантажень. Розглянута проблематика пов'язана з обґрунтуванням захисних споруд, які сприймають короткочасні імпульсні навантаження, дію ударної хвилі та уламковий вплив. Оцінювання надійності конструкцій за таких умов передбачає врахування характеру навантаження, міцності матеріалів, конструктивної схеми та граничних станів.

У працях [4–6] розглянуто питання моделювання системи «ґрунт–фундамент–будівля», оцінювання стійкості конструкцій та забезпечення роботи будівель на слабких ґрунтах. Для захисних споруд енергооб'єктів ці положення пов'язані з передаванням навантажень від масивних залізобетонних елементів на фундаментну плиту та ґрунтову основу, а також з урахуванням нерівномірних осідань, локальних навантажень і динамічного впливу.

У праці [7] розглянуто вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Після вибухового або уламкового пошкодження енергооб'єкта можливий розвиток пожежі через пошкодження маслonaповненого обладнання, кабельних трас або допоміжних технологічних систем. Тому фізичний захист має охоплювати механічну дію, температурний вплив і вогнестійкість несучих та огороджувальних конструкцій.

У роботі [8] наведено підходи до будівництва дрібних захисних фортифікаційних споруд із залізобетону. Розглянуті конструктивні рішення пов'язані із заводським виготовленням, монтажною придатністю, геометричною простотою та здатністю конструкції сприймати зовнішні силові впливи.

Фізичний захист енергооб'єктів – сукупність конструктивних рішень, спрямованих на зменшення наслідків прямого або непрямого ураження технологічного обладнання (рис. 1). До об'єктів захисту належать силові автотрансформатори, трансформатори власних потреб, розподільчі пристрої, кабельні канали, системи керування, резервні джерела живлення та допоміжні технологічні системи.



Рис. 1. Методи фізичного захисту

Пошкодження об'єктів різного функціонального призначення вказують на обмежений опір легких огорожувальних конструкцій, тонкостінних панелей і металевих оболонок вибуховому та уламковому впливу. Для енергетичного обладнання фізичний захист спрямовується на обмеження прямого контакту засобу ураження з технологічним вузлом, зменшення дії уламків, локалізацію можливого займання та збереження доступу до обладнання для обслуговування й аварійного реагування.

Конструктивні рішення фізичного захисту енергооб'єктів можна поділити на кілька груп. До першої належать тимчасові або швидкокомтовані споруди: габіони, блоки, насипні екрани, збірні залізобетонні елементи. Вони застосовуються для локального екранування обладнання, а їх робота визначається геометрією розміщення, висотою, масою, стійкістю до перекидання та здатністю сприймати уламковий вплив.

Друга група охоплює заглиблені та напівзаглиблені споруди. Такі рішення передбачають розміщення обладнання нижче рівня поверхні землі або в частково заглиблених об'ємах. Вони зменшують відкритість обладнання до уламкової дії та ударної хвилі, але потребують урахування вентиляції, дренажу, пожежної безпеки, доступу для ремонту, монтажу й демонтажу великогабаритного обладнання.

Третю групу становлять наземні монолітні захисні споруди у вигляді залізобетонних оболонок або саркофагів. До їх складу входять масивні стіни, перекриття, технологічні прорізи, вентиляційні канали, протипожежні відсіки та додаткові екрани. Конструктивна схема таких споруд формується з

урахуванням вибухового навантаження, уламкової дії, можливої пожежі, температурного впливу та роботи фундаментної системи.

Окрему групу становлять комбіновані рішення, у яких залізобетонна оболонка поєднується з додатковими екранами. Зовнішній екран змінює умови взаємодії засобу ураження із захищеною спорудою, а основна залізобетонна конструкція сприймає залишковий вплив.

Проектування фізичного захисту передбачає оцінювання просторової роботи всієї споруди, а не лише окремої стіни або перекриття. Залізобетонна оболонка працює як єдина конструктивна система, у якій стіни, перекриття, фундаментна плита та вузли сполучення забезпечують сприйняття навантажень і передачу зусиль на основу. У разі імпульсного впливу враховуються жорсткість, тріщиностійкість, характер армування, анкерування арматури та опір локальному продавлюванню.

Фундаментна система забезпечує передавання навантажень від захисної споруди на ґрунтову основу. Масивні залізобетонні конструкції створюють додаткове навантаження, а дія вибуху має короточасний динамічний характер. Розрахунок системи «споруда – фундаментна плита – ґрунтова основа» охоплює нерівномірні осідання, роботу слабких ґрунтів і вплив локальних навантажень.

Пожежна складова фізичного захисту пов'язана з наявністю маслonaповненого обладнання, кабельних трас, полімерної ізоляції та допоміжних технологічних систем. У разі пошкодження трансформатора можливе займання трансформаторного масла, поширення теплового впливу на конструкції та повторне пошкодження суміжного обладнання. Захисна споруда має поєднувати конструктивну міцність із протипожежним поділом, димовидаленням, вентиляцією, збором аварійних витоків і вогнестійкістю основних елементів.

Для наземних захисних споруд необхідно забезпечувати експлуатаційну придатність. Захисна оболонка не повинна унеможлилювати охолодження обладнання, огляд, ремонт, заміну агрегатів, підведення кабельних і шинних з'єднань. Конструктивне рішення поєднує захисні функції з вимогами технологічної експлуатації, включаючи вентиляційні прорізи, захищені канали, протипожежні відсіки та доступ для аварійних служб.

Тип фізичного захисту визначається призначенням об'єкта, характеристиками обладнання, видом можливого впливу, умовами майданчика, ґрунтовою основою, наявною забудовою та можливостями будівельно-монтажних робіт. Тимчасові споруди застосовуються для локального екранування, заглиблені рішення пов'язані з улаштуванням захищеного об'єму нижче рівня землі, а монолітні наземні споруди формують просторову оболонку навколо обладнання.

Формування фізичного захисту енергооб'єкта включає визначення критичних елементів обладнання, встановлення можливих видів впливу, прийняття конструктивної схеми захисної споруди, розрахунок вибухових, уламкових і температурних навантажень, перевірку залізобетонних конструкцій, оцінювання роботи фундаментної плити та ґрунтової основи, а також урахування протипожежних і експлуатаційних вимог.

Таким чином, фізичний захист енергооб'єктів формується як система конструктивних рішень, що охоплює силове обладнання, кабельні системи, допоміжні технологічні вузли та елементи керування. Його структура враховує вибуховий, уламковий, пожежний і ґрунтово-фундаментний вплив.

Для захисту енергетичного обладнання застосовуються тимчасові екранувальні споруди, заглиблені або напівзаглиблені об'єми, наземні монолітні залізобетонні оболонки та комбіновані системи з додатковими екранами. Кожне рішення має конструктивні, технологічні й експлуатаційні обмеження, пов'язані з умовами майданчика, доступом до обладнання, протипожежним захистом і роботою фундаментної системи.

[1]. Rashkevich N. V. (2023). Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій на територіях України, які зазнали ракетно-артилерійських уражень. [Analysis of the current state of emergency prevention in the territories of Ukraine affected by rocket and artillery attacks]. Комунальне господарство міст. Т. 4, вип. 178. С. 232–251. DOI: 10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251 [in Ukrainian].

[2]. Rashkevich N. V., Ivanov V. (2023). Питання стійкості систем життєзабезпечення. [Issues of resilience of life support systems]. Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: НУЦЗ України. С. 120–121. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18320> [in Ukrainian].

[3]. Purdenko R. R., Otrosh Yu. A., Rashkevich N. V. (2026). Оцінка надійності будівельних конструкцій під впливом вибухових навантажень. [Assessment of the reliability of building structures under the influence of blast loads]. Механіка та математичні методи. Т. 8, № 1. С. 28–40. DOI: 10.31650/2618-0650-2026-8-1-28-40. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28165> [in Ukrainian].

[4]. Purdenko R. R., Otrosh Yu. A., Rashkevich N. V., Surianinov V. M. (2024). Моделювання стійкості та надійності системи ґрунт–фундамент–будівля при дії силових та високотемпературних впливів. [Modelling the stability and reliability of the soil–foundation–building system under force and high-temperature effects]. Механіка та математичні методи. Т. 6, вип. 1. С. 36–48. DOI: 10.31650/2618-0650-2024-6-1-36-48 [in Ukrainian].

[5]. Purdenko R. R., Rashkevich N. V., Otrosh Yu. A. (2024). Оцінка стійкості будівельних конструкцій на основі моделювання взаємодії системи ґрунт–фундамент–будівля. [Assessment of the stability of building structures based on modelling the interaction of the soil–foundation–building system]. Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, м. Черкаси, 24–25 жовтня 2024 р. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв

- Чорнобиля НУЦЗ України. С. 183–186. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22211> [in Ukrainian].
- [6]. Rashkevich N. V., Otrosh Yu. A. (2024). Підходи до забезпечення стійкості будівель на слабких ґрунтах. [Approaches to ensuring the stability of buildings on weak soils]. Актуальні проблеми інженерної механіки: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції, м. Одеса, 5–7 червня 2024 р. Одеса: ОДАБА. С. 88–90. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20631> [in Ukrainian].
- [7]. Otrosh Yu. A., Kovalov A. I., Purdenko R. R., Rashkevich N. V., Maiboroda R. I. (2022). Вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів. [Fire resistance of fire-protected reinforced concrete structures for increasing the level of fire safety of facilities]. Проблеми надзвичайних ситуацій. № 2(36). С. 102–121. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-36-9 [in Ukrainian].
- [8]. Bezuglyi Ya. P., Otrosh Yu. A., Maiboroda R. I., Rashkevich N. V. (2022). Будівництво дрібних захисних фортифікаційних споруд – залізобетонних бліндажів циліндричної форми заводського виготовлення. [Construction of small protective fortification structures – factory-made cylindrical reinforced concrete dugouts]. Вісник Донецького гірничого інституту. № 2(51). С. 7–13. DOI: 10.31474/1999-981X-2022-2-7-13 [in Ukrainian].

APPROACHES TO THE PHYSICAL PROTECTION OF ENERGY FACILITIES

The paper considers approaches to the physical protection of energy facilities under conditions of rocket and artillery strikes and UAV attacks. Structural solutions are summarized, including temporary screens, buried structures, reinforced concrete enclosures, and combined systems. Consideration is given to blast, fragment, fire, and soil–foundation effects on elements of energy infrastructure.

УДК 621.311:614.841

КОМБІНОВАНИЙ ЗАХИСТ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ

Отрош Ю.А., д.т.н., проф., Рашкевич Н.В., д.ф., доц., Мельник І.В.
Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Сучасні умови функціонування енергооб'єктів характеризуються поєднанням воєнних, техногенних, пожежних, вибухових та екологічних чинників небезпеки. Пошкодження окремого конструктивного елемента, технологічного вузла або інженерної системи може спричинити порушення роботи об'єкта, розвиток пожежі, вибухонебезпечну ситуацію, втрату

електропостачання, забруднення навколишнього середовища та ускладнення аварійно-рятувальних робіт.

У роботі [1] проаналізовано хронологію терористичних атак по території України ударними безпілотними літальними апаратами у січні 2025 року. Наведені дані відображають системний характер застосування ударних БПЛА та масованість повітряних атак по об'єктах інфраструктури. Навіть за високої результативності засобів протиповітряної оборони частина засобів ураження або їх уламків може досягати території об'єкта, формуючи залишковий ризик для будівель, споруд і технологічного обладнання.

У роботі [2] розглянуто методи попередження надзвичайних ситуацій техногенного та медико-біологічного характеру на об'єктах критичної інфраструктури, зокрема ідентифікацію небезпечних чинників, моніторинг, прогнозування аварійних ситуацій та інженерно-технічні заходи зниження ризику. У дослідженні [3] сформовано умови існування математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій на територіях, забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження, з урахуванням первинних і вторинних наслідків воєнного впливу, пов'язаних із пошкодженням конструкцій, інженерних мереж, технологічного обладнання та забрудненням територій. У роботі [4] наведено оцінку радіаційного впливу під час аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива та окреслено поширення небезпечних чинників з урахуванням просторово-часових параметрів впливу.

Пожежну небезпеку об'єктів критичної інфраструктури розглянуто у роботі [5]. Пошкодження обладнання, кабельних трас, резервних джерел живлення, трансформаторного обладнання або технологічних приміщень може супроводжуватися горінням і тепловим впливом на несучі конструкції. Унаслідок цього пожежна складова розглядається як один із чинників розвитку аварійного сценарію після механічного або вибухового пошкодження.

У роботі [6] проаналізовано стан забезпечення безпеки гідротехнічних споруд. Розглянуто питання моніторингу, виявлення загроз, оповіщення та забезпечення стійкості споруд, що мають важливе значення для гідроенергетичних об'єктів. Порушення роботи таких споруд може супроводжуватися поєднанням механічних, гідродинамічних і техногенних наслідків.

Праці [7,8] присвячені методикам розрахунку прогресуючого обвалення та програмній реалізації оцінювання стійкості будівель. У цих дослідженнях розглянуто сценарії, за яких локальне пошкодження конструкції може поширюватися на суміжні елементи та призводити до втрати просторової стійкості. У роботі [9] удосконалено математичну модель теплопередачі системи «залізобетонна колона–перекриття», що пов'язано з оцінюванням

роботи залізобетонних конструкцій за умов післяаварійного теплового впливу.

Комбінований захист енергооб'єктів формується як система інженерних, конструктивних і організаційно-технічних рішень, спрямованих на зниження ймовірності прямого пошкодження основних технологічних елементів та обмеження вторинних наслідків. До її складу входять зовнішній бар'єрний контур, несучі й огорожувальні конструкції, засоби моніторингу, протипожежний захист, аварійне реагування та післяаварійний контроль.

З урахуванням сучасних повітряних загроз зовнішній контур може бути представлений сталевим каркасом із сітчастим екраном, розміщеним над захищуваним об'ємом. У розрахунковій схемі розглядається сітчастий бар'єр, розташований на висоті 5 м над рівнем перекриття захисної оболонки. Його призначення полягає у зміні умов взаємодії ударного БПЛА із захищеною спорудою. При контакті з перешкодою можливі механічне пошкодження елементів БПЛА, втрата траєкторної стійкості, зміщення точки вибухової взаємодії або дистанціювання вибухового навантаження від основного перекриття.

Перший контур не замінює засоби протиповітряної оборони, а виконує функцію інженерного бар'єра останньої лінії. Його застосування спрямоване на зменшення ймовірності прямого контактного ураження перекриття або технологічного обладнання. Для вибухового навантаження відстань між точкою взаємодії та захищеною конструкцією впливає на рівень надлишкового тиску, імпульсу та локальної дії уламків, оскільки ці параметри залежать від масштабованої відстані, маси заряду, геометрії перешкод та умов відбиття ударної хвилі.

Другий контур захисту представлений залізобетонною оболонкою. У розрахунковій схемі вона може мати вигляд монолітної коробчастої конструкції зі стінами товщиною 1,0 м та перекриттям товщиною 0,6 м. Основними функціями цього контуру є сприйняття залишкового надлишкового тиску, обмеження проникнення уламків, збереження просторової стійкості споруди та захист технологічного об'єму від зовнішнього впливу.

Залізобетонна оболонка розглядається не лише як масивний бар'єр, а як конструктивна система, робота якої залежить від класу бетону, армування, граничних умов обпирання, фундаментної плити, взаємодії з ґрунтовою основою та можливого температурного впливу після аварії. У межах такого підходу розрахунковий сценарій може включати послідовність: вибухове навантаження, локальне пошкодження, розвиток пожежі та перевірку залишкової несучої здатності конструкцій.

Пожежна складова є окремим елементом комбінованого захисту. Після вибухового або уламкового пошкодження можливе займання кабельних трас,

мастил, полімерних матеріалів, ізоляції, трансформаторного обладнання або допоміжних систем. Тому конструктивний захист має поєднуватися з раннім виявленням пожежі, локалізацією горіння, обмеженням поширення диму й зменшенням температурного впливу на несучі елементи.

Для енергооб'єктів, пов'язаних із гідротехнічними спорудами, додаткового врахування потребують стан дамб, водоскидів, машинних залів, насосних станцій, підірних конструкцій і систем моніторингу. Порушення роботи цих елементів може спричинити поєднання механічних, гідродинамічних і техногенних наслідків. У таких умовах захисні рішення мають охоплювати не лише оболонку окремої споруди, а й суміжні інженерні системи, від яких залежить безпечна експлуатація об'єкта.

У разі наявності потенційно небезпечних речовин або відпрацьованих матеріалів система комбінованого захисту має включати локалізацію забруднення та післяаварійний моніторинг. Такі заходи стосуються сценаріїв, у яких пошкодження конструкцій або технологічного обладнання супроводжується радіаційним, хімічним чи біологічним впливом. Післяаварійний контроль у цьому випадку спрямований на визначення меж небезпечної зони, оцінювання рівня впливу та обґрунтування подальших дій з локалізації наслідків.

Економічна складова комбінованого захисту пов'язана зі співвідношенням витрат на зовнішній бар'єрний контур і параметрів внутрішньої залізобетонної оболонки (рис. 1). У разі прямого контактного впливу без зовнішнього екрана зростають вимоги до товщини перекриття, маси споруди, фундаментної плити та ґрунтової основи. За наявності сітчастого бар'єра частина енергії впливу реалізується на відстані від основної конструкції, а внутрішній контур сприймає залишкове навантаження.

Узагальнена схема комбінованого захисту енергооб'єкта охоплює аналіз сучасних повітряних загроз, визначення сценаріїв ураження, формування зовнішнього бар'єрного контуру, розрахунок залишкового вибухового й уламкового впливу на залізобетонну оболонку, перевірку стійкості несучих конструкцій, урахування пожежного та температурного впливу, оцінювання роботи фундаментної системи, організацію моніторингу та післяаварійного контролю.

Економічний ефект

01

Вартість об'єкта та ризики

120 млн грн — середня ринкова вартість нового автотрансформатора.

+15% до ціни — витрати на логістику (вага 225 т), спецтранспорт та монтаж.

9–14 місяців — термін виготовлення та поставки нового обладнання.

Критичний фактор: У період енергодефіциту простій такої тривалості є неприпустимим.

02

Витрати на капітальний захист

Бетонні роботи: 8.5 – 10.0 млн грн (монолітний ЗБ об'ємом ~600 м³).

Металоконструкції: 6.5 – 8.0 млн грн (детонаційний екран та балки Б1/Б2).

Монтаж: 3.0 – 4.0 млн грн (загальнобудівельні та пусконаладжувальні роботи).

Загальний бюджет: 18 – 22 млн грн.



Доцільність

Співвідношення 1:6 — вартість захисту становить лише 17% від вартості обладнання.

Статистика атак: Висока інтенсивність ударів у 2025–2026 рр. робить захист обов'язковим.

Миттєва окупність: Одне влучання «Shahed», зупинене екраном, повністю покриває всі витрати.

Соціальний ефект: Запобігання збиткам від знеструмлення регіону, які за добу можуть перевищити вартість споруди.

Рис. 1. Порівняння конструктивних варіантів комбінованого захисту

Таким чином, комбінований захист енергооб'єктів має формуватися як узгоджена система інженерних рішень, у якій зовнішній бар'єрний контур, залізобетонна захисна оболонка, протипожежні заходи та моніторинг технічного стану працюють як єдиний комплекс.

Зовнішній сітчастий екран змінює характер взаємодії засобу ураження із захищуваною спорудою та переносить зону вибухового впливу від основних конструкцій. За таких умов залізобетонна оболонка сприймає залишкове вибухове, уламкове й теплове навантаження, зберігаючи функціональну стійкість захищуваного об'єму.

Запропонований підхід розглядає захист енергооб'єкта не як окреме конструктивне підсилення, а як систему зниження наслідків повітряного, вибухового, пожежного та техногенного впливу.

[1]. Azarenko O., Diviziniuk M., Shevchenko O., Rashkevich N. V., Huz A., Olefirenko O. (2025). Хронологія терористичних атак по території України ударними дронами в січні 2025 року. [Chronology of terrorist attacks on the territory of Ukraine by attack drones in January 2025]. *Social Development and Security*. Vol. 15, № 6. С. 175–189. DOI: 10.33445/sds.2025.15.6.17 [in Ukrainian].

[2]. Loboichenko V. M., Diviziniuk M. M., Shevchenko R. I., Fedorchuk-Moroz V. I., Rashkevich N. V. (2025). Методи попередження надзвичайних ситуацій техногенного та медико-біологічного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за використання ідентифікації водних розчинів. [Methods for preventing technogenic and medical-biological emergencies at critical infrastructure facilities using identification of aqueous solutions]. Луцьк: Вежа-Друк. 321 с. ISBN 978-966-940-673-6. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25384> [in Ukrainian].

- [3]. Rashkevich N., Shevchenko O., Rushchak I., Kradozhon V., Krasnov V. (2025). Формування умов існування математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій на територіях забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження. [Formation of conditions for the existence of a mathematical model for preventing emergencies in territories contaminated with remnants of rocket and artillery damage]. *Social Development and Security*. Vol. 15, № 5. С. 151–161. DOI: 10.33445/sds.2025.15.5.12 [in Ukrainian].
- [4]. Krasnov V. A., Rashkevich N. V. (2025). Оцінка радіаційного впливу під час аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива. [Assessment of radiation impact during an accident at a spent nuclear fuel storage facility]. *Комунальне господарство міст. Серія: Інформаційні технології та інженерія*. Т. 6, вип. 194. С. 74–81. DOI: 10.33042/3083-6727-2025-6-194-74-81 [in Ukrainian].
- [5]. Hryshchenko A. A., Rashkevich N. V., Otrosh Yu. A. (2025). Аналіз пожежної небезпеки об'єктів критичної інфраструктури. [Analysis of fire hazard of critical infrastructure facilities]. *Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, м. Черкаси, 14 травня 2025 р. Черкаси: НУЦЗ України*. С. 27–28. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25461> [in Ukrainian].
- [6]. Rashkevich N. V., Plotnykov I. V., Otrosh Yu. A., Chuchmai O. M. (2024). Аналіз стану забезпечення безпеки гідротехнічних споруд. [Analysis of the state of ensuring the safety of hydraulic structures]. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. № 4. С. 314–322. DOI: 10.32782/tnv-tech.2024.4.32 [in Ukrainian].
- [7]. Otrosh Yu. A., Maiboroda R. I., Rashkevich N. V., Romin A. V. (2023). Дослідження методик розрахунку прогресуючого обвалення. [Study of methods for calculating progressive collapse]. *Механіка та математичні методи*. Т. 5, вип. 2. С. 25–40. DOI: 10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40 [in Ukrainian].
- [8]. Maiboroda R. I., Otrosh Yu. A. (2025). Програмна реалізація оцінювання стійкості будівель до прогресуючого обвалення. [Software implementation of assessing the resistance of buildings to progressive collapse]. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. № 1(41). С. 177–193. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-12 [in Ukrainian].
- [9]. Maiboroda R. I., Otrosh Yu. A. (2025). Удосконалення математичної моделі теплопередачі системи «залізобетонна колона–перекриття». [Improvement of the mathematical model of heat transfer in the “reinforced concrete column–floor slab” system]. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. № 1(19). С. 97–108. DOI: 10.33269/nvcz.2025.1(19).97-108 [in Ukrainian].

COMBINED PROTECTION OF ENERGY FACILITIES

The paper considers combined protection of energy facilities under conditions of military, technogenic, fire, blast, and environmental hazards. Approaches to the formation of a two-contour protection system combining an external mesh barrier and an internal reinforced concrete enclosure are summarized. Consideration is given to residual blast, fragment, fire, thermal, and technogenic effects on structures and technological equipment of energy infrastructure.

УДК 614.841.3:621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ НА АВТОТРАНСФОРМАТОРАХ, ЩО ВСТАНОВЛЮЮТЬСЯ В ЗАХИСНИХ СПОРУДАХ

Пальчиков Р.В., аспірант, Ніжник В.В., д.т.н., професор

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України, м. Київ

Тригуб В.В., к.т.н., доцент

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Пожежі на трансформаторному обладнанні становлять одну з найбільших загроз для енергетичної інфраструктури. За статистичними даними, близько половини пожеж в енергетичному секторі пов'язані саме з трансформаторами [1].

В умовах воєнного стану трансформаторне обладнання стало однією з основних цілей ворожих ударів. За період повномасштабної агресії по об'єктах трансформаторної інфраструктури завдано близько 600 ударів. Відповідно до [2] трансформатори розміщуються у захисних спорудах. Для конструкцій таких споруд встановлено вимоги щодо забезпечення класу вогнестійкості не нижче REI 90 за умов впливу температурного режиму вуглеводневої пожежі [3].

Разом із тим застосування вуглеводневої температурної кривої не повною мірою враховує специфіку розвитку пожежі у замкнутому просторі, де обмежений доступ кисню суттєво впливає на інтенсивність горіння та температурний режим. Тому актуальним є дослідження реального температурного режиму пожежі трансформаторів у захисних спорудах.

Для теоретичного обґрунтування модифікованого температурного режиму використано математичний апарат, заснований на повній системі рівнянь Нав'є-Стокса. Базова модель доповнена моделями, які дозволяють врахувати геометричні параметри приміщення, теплофізичні характеристики конструкцій, вплив прорізів у зовнішніх стінах на притік кисню та видалення продуктів горіння, пожежне навантаження, інтенсивності горіння та тепловиділення.

У якості розрахункового сценарію прийнято пожежу в захисній споруді, де встановлено трансформатор класу АТ-750 кВ. Передбачалося, що внаслідок аварії трансформаторне мастило виливається та розтікається по всій площі підлоги приміщення. Розрахункова площа споруди становила 348 м², а висота – 18 м. Для дослідження температурного режиму встановлено

датчики температури на рівнях 1 м, 10 м та 18 м від рівня підлоги на відстані 100 мм від поверхні конструкцій.

Результати теоретичних досліджень показали, що найбільші температури спостерігаються у верхній частині споруди, на рівні 18 м, що пояснюється підйомом гарячих продуктів горіння та формуванням високотемпературного димового шару. Саме дані, отримані на цій висоті, використані для подальшого аналізу температурного режиму пожежі. На основі усереднених значень температур побудовано температурну криву розвитку пожежі та проведено її порівняння зі стандартною та вуглеводневою температурними кривими [4].

Отримані результати свідчать, що температура в захисній споруді інтенсивно зростає на початковому етапі пожежі, наближаючись до режиму вуглеводневої пожежі, однак після приблизно 30 хвилин спостерігається її поступове зниження. Це пояснюється вигоранням пожежного навантаження та дефіцитом кисню в умовах обмеженого простору.

Для перевірки достовірності теоретичних результатів проведено експериментальні дослідження на фізичній моделі захисної споруди. Оскільки проведення повномасштабного експерименту є економічно та технічно недоцільним, використано метод фізичного моделювання із дотриманням критеріїв геометричної та динамічної подібності. Масштаб моделі становив $\lambda=0,23$, що дозволило визначити геометричні параметри моделі та відповідні теплові потоки.

Для моделювання пожежі використано стандартизоване вогнище класу 233В, заповнене трансформаторним мастилом. Температурні вимірювання проводилися за допомогою п'яти термопар, встановлених під покриттям споруди. Експериментальні результати підтвердили характер розвитку пожежі, отриманий під час теоретичних досліджень: швидке початкове зростання температури змінювалося уповільненням розвитку пожежі через зменшення концентрації кисню.

Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень показало достатній рівень збіжності. Абсолютні відхилення становили близько 150 °С, відносні – до 35 %, а середньоквадратичне відхилення – близько 90 °С. При цьому теоретична модель не враховувала стадію затухання пожежі, що створює додатковий запас безпеки під час оцінювання вогнестійкості конструкцій.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що реальний температурний режим пожежі у захисних спорудах для трансформаторів є менш інтенсивним, ніж режим вуглеводневої пожежі, який наразі використовується в нормативних документах. На підставі проведених досліджень обґрунтовано можливість встановлення вимог до класу вогнестійкості огорожувальних конструкцій на рівні не менше REI 45 з

урахуванням коефіцієнта запасу 1,2. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення нормативно-правової бази у сфері пожежної безпеки захисних споруд для трансформаторів.

[1]. Аналітичні довідки про пожежі та їх наслідки в Україні 2014–2024 рр. [Analytical reports on fires and their consequences in Ukraine in 2014–2024]. Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України. URL: <https://indcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh> (дата звернення: 10.10.2025) [in Ukrainian].

[2]. Деякі питання інженерного захисту критичної інфраструктури [Some issues of engineering protection of critical infrastructure]: Постанова Кабінету Міністрів України від 26 квітня 2024 р. № 471. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/kp240471> (дата звернення: 10.10.2025) [in Ukrainian].

[3]. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008. Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT) [Eurocode. Basis of structural design]. Чинний від 01.01.2008. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2008. 141 с. [in Ukrainian].

[4]. Пальчиков Р.Р., Ніжник В.В. Дослідження температурного режиму пожежі в захисній споруді для автотрансформатора [Study of the fire temperature regime in a protective structure for an autotransformer]. Комунальне господарство міст. 2025. Т. 6, вип. 194. Серія: Технічні науки та архітектура. С. 347–352 [in Ukrainian].

STUDY OF THE FIRE TEMPERATURE REGIME IN AUTOTRANSFORMERS INSTALLED IN PROTECTIVE STRUCTURES

The paper investigates the fire temperature regime of autotransformers installed in protective structures. The study considers the influence of limited oxygen supply, room geometry, fire load, heat release intensity, and heat transfer to enclosing structures. Based on theoretical and physical modelling, the specific features of fire development in a confined space are determined. The obtained results indicate that the real temperature regime differs from the hydrocarbon fire curve and may be used to justify fire resistance requirements for enclosing structures of transformer protective facilities.

УДК 666.972.17:691.532:541.128

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ГАЗОВИДІЛЕННЯ В РОЗЧИНОВІЙ СУМІШІ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНУ

Шульгін В. В., к. т. н., доц., Попович Н. М., к. т. н., доц.

Петраш О. В., к. т. н., доц., Бондар Л. В., к. т. н., доц.

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава

Сучасні вимоги до енергоефективності будівель та потреби повоєнної відбудови України зумовлюють необхідність розширення виробництва ефективних стінових матеріалів із високими теплоізоляційними властивостями та низькою енергоємністю виготовлення. Одним із перспективних матеріалів є неавтоклавний газобетон, однак його виробництво супроводжується проблемою забезпечення стабільної пористої структури та необхідних фізико-механічних властивостей. Особливого значення набуває дослідження кінетики газовиділення та впливу хімічних добавок на процеси структуроутворення газобетону.

Метою дослідження є вивчення кінетики газовиділення в розчиновій суміші та визначення впливу кальцинованої і каустичної соди та температури суміші на процес спучування і властивості неавтоклавного газобетону.

Процес спучення розчинової суміші вивчали на спеціальному розробленому приладі із електронним модулем, який передавав інформацію для оброблення на планшет із побудовою графіків спучування (рис 1).

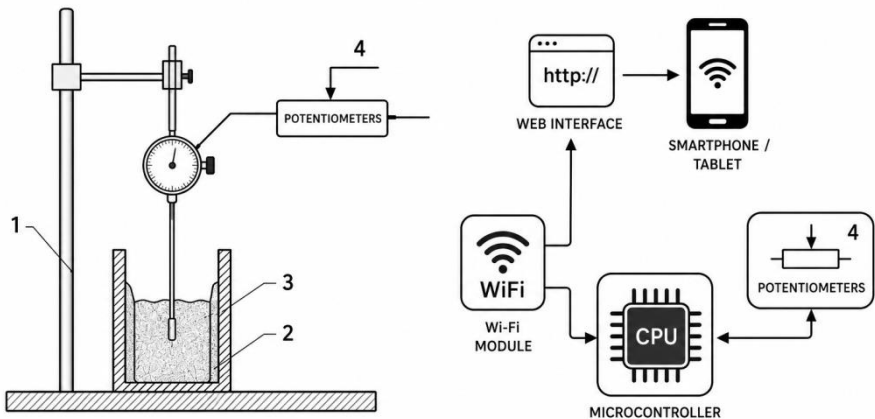


Рис. 1. Схема приладу для дослідження кінетики газовиділення в розчиновій суміші

Розчинну суміш готували в лабораторному швидкісному змішувачі тривалістю перемішування три хвилини. Далі визначали середню густину розчинної суміші, а потім вводили заздалегідь приготовлену омилену водну суспензію алюмінієвої пудри і перемішували ще одну хвилину. Після чого відразу суміш вивантажували в металевий теплоізолюваний циліндр, попередньо нагрітий до заданої температури, підводили поплавок до розчинної суміші і проводили запис процесу спучення розчинової суміші та визначали густину розчинової суміші. На рисунку 2 наведений графік кінетики газовиділення в суміші.

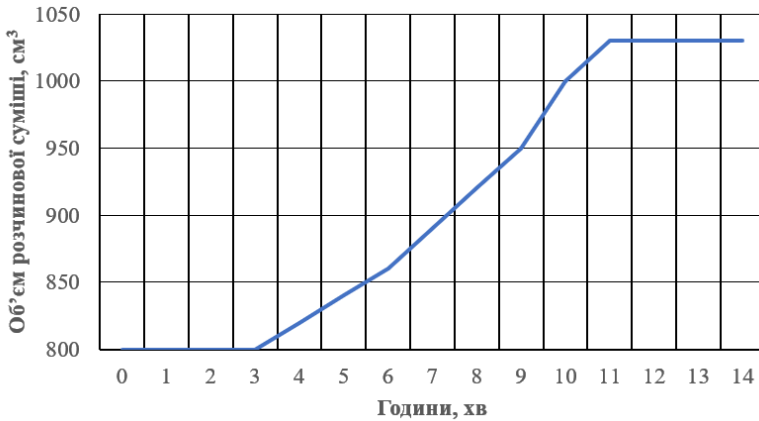


Рис. 2. Графік кінетики газовиділення в розчинової суміші

Дослідження кінетики газовиділення в розчинової суміші при використанні добавки кальцинованої соди (Na_2CO_3) проводилися з використанням тривірневого плану проведення експериментів при кількості двох факторів (витрата добавки, температура суміші). В якості вихідних параметрів досліджували початок спучування, спучування та тривалість спучування.

Діапазон варіювання факторів був наступним: витрата добавки: 0,3% – 0,6% – 0,9%; температура суміші: 20°C – 33°C – 46°C.

Для аналізу експериментальних даних використовувався програмний комплекс STATISTICA 12, що дозволило отримати рівняння регресії та графічні залежності, які відображають вплив досліджуваних факторів на процес спучування розчинової суміші.

Встановлено адекватність рівняння регресії за критерієм відповідності Фішера: розрахункове значення критерію ($F_r = 3,35$) було меншим за табличне значення ($F = 19,2$), що свідчить про прийнятність отриманих математичних моделей.

За рівнянням регресії побудовано графік загального вигляду поверхні функції відгуку початку спучування розчинової суміші (Рис.3). Аналіз графічної залежності дозволяє встановити, що підвищення температури суміші та збільшення витрати добавки сприяють прискоренню процесу спучування. При цьому початок спучування протікає найшвидше при витраті Na_2CO_3 0,6% та температурі 45°C , тоді як при збільшенні температури за 45°C відзначається сповільнення початку спучування, що може бути пов'язано з прискороною дегазацією суміші.

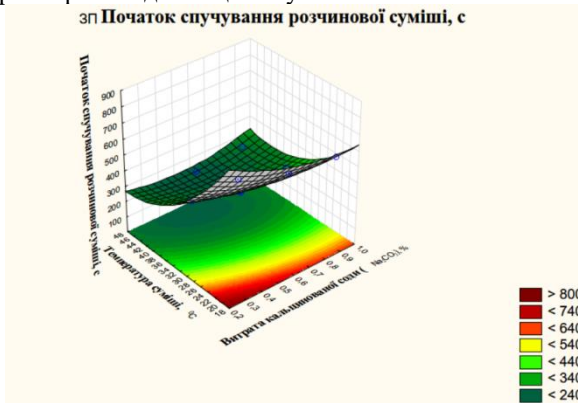


Рис. 3. Загальний вид поверхні функції відгуку початку спучування розчинової суміші від витрати кальцинованої соди та температури суміші

Для подальшого аналізу було використано діаграму Парето (рис. 4), за якою було встановлено що найбільший вплив на початок спучування чинить температура. Значимості коефіцієнтів рівняння регресії були визначені за критерієм Стьюдента – 5 значимих коефіцієнтів.

Аналіз графіків середніх значень початку спучування розчинової суміші показує, що найшвидше цей процес розпочинається при температурі 46°C і триває 240 секунд. Це свідчить про те, що підвищення температури активізує хімічні реакції, відповідальні за газоутворення, що є ключовим фактором для ефективного формування пористої структури матеріалу.

При цьому підтверджується оптимальна витрата кальцинованої соди на рівні 0,6%, оскільки саме за цього дозування досягається баланс між швидкістю процесу спучування та якістю отриманої структури. Збільшення витраті кальцинованої соди понад зазначене значення може призвести до надмірного або нерівномірного газовиділення, що негативно впливає на стабільність та рівномірність пористої матриці.

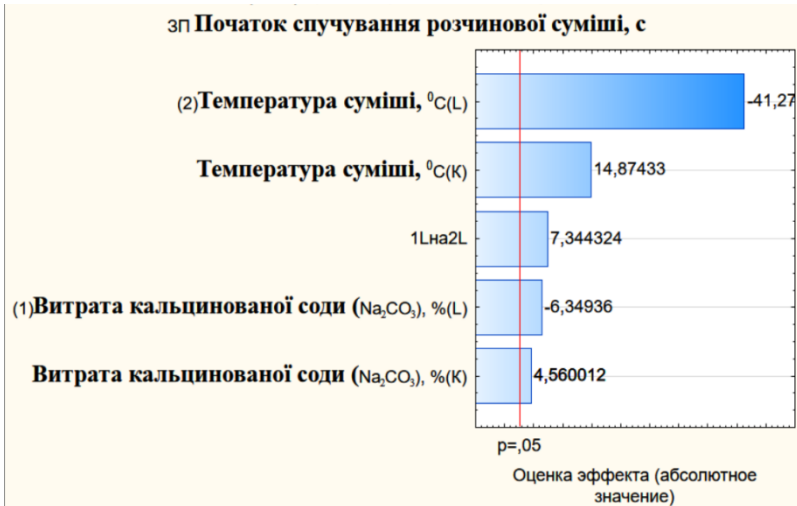


Рис. 4. Діаграма ефектів Парето початку спучування розчинової суміші

Аналіз отриманих результатів показує, що процес спучування розчинової суміші відбувається швидше при використанні каустичної соди, з часом початку спучування 150 с, у порівнянні з кальцинованою содою, для якої цей показник становить 240–270 с. При цьому оптимальними параметрами для процесу спучування є витрата кальцинованої соди 0,6% та температура 40°C, аналогічно для каустичної соди – 0,6% при тій самій температурі.

Дослідження показали, що загальний час спучування розчинової суміші при застосуванні кальцинованої соди становить 210–240 с, тоді як використання каустичної соди значно подовжує цей процес до 540–600 с. Це свідчить про різну кінетику газовиділення при застосуванні зазначених добавок та їхній вплив на структуру утворюваного матеріалу.

Одним із ключових висновків дослідження стало те, що застосування добавок дозволяє відмовитися від попереднього підігріву суміші, що суттєво знижує енергетичні витрати у виробництві. Це відкриває нові можливості щодо зменшення собівартості продукції, спрощення технологічного процесу та підвищення якості кінцевих виробів.

Використання розробленого приладу та методики для вивчення кінетики газовиділення в поєднанні з персональними електронно-обчислювальними машинами (ПЕОМ) дозволяє оперативно проводити розрахунки, аналізувати отримані результати та коригувати склад газобетону. Це дає можливість

враховувати характеристики вихідних матеріалів та забезпечувати стабільну якість продукції як у лабораторних, так і у виробничих умовах.

Таким чином, використання зазначених технологічних прийомів дозволяє:

- Оптимізувати компонентний склад вихідної суміші, що сприяє рівномірному спучуванню та стабільному формуванню пористої структури.
- Отримувати газобетонні вироби завтоклавного твердіння з різною середньою густиною та заданими будівельно-технічними властивостями.
- Завдяки введенню спеціальних добавок впливати на формування пористої структури газобетону, забезпечуючи домінуючий розмір пор у межах 1–2 мм, що позитивно позначається на теплоізоляційних і міцнісних характеристиках матеріалу.

Результати досліджень підтверджують ефективність застосування розроблених методик і технологічних рішень, що дозволяє підвищити якість газобетону та забезпечити його економічну доцільність у виробництві.

1. Demchenko, O., Shulgin, V., Petrash, R. Experimental study on light concrete properties using bottom ash of thermal power stations. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, No. 3.2. P. 1–5. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.26.14366.
2. Cabrillac, R., Fiorio, B., Beaucour, A., Dumontet, H., Ortola, S. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity. *Construction and Building Materials*. 2006. Vol. 20, No. 5. P. 286–295. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.024.
3. Herega, A.N. Physical aspects of self-organization processes in composites. The structure and interaction of inner boundaries. *Nanomechanics Science and Technology*. 2013. Vol. 4. P. 17–20.
4. Poznyak, O., Sanytsky, M., Zavadsky, I., Braichenko, S., Melnyk, A. Research into structure formation and properties of the fiber-reinforced aerated concrete obtained by the non-autoclaved hardening. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3, No. 6 (93). P. 39–46. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.133272.
5. Pozniak, O., Melnyk, A. Non-autoclave aerated concrete from modified binders composition containing supplementary cementitious materials. *Budownictwo i Architektura*. 2014. Vol. 13, No. 2. P. 127–134. DOI: 10.35784/bud-arch.1947.
6. Demchyna, B., Vozniuk, L., Surmai, M. Scientific foundations of solving engineering tasks and problems. Boston: Primedia eLaunch, 2021. Vol. 19, No. 1. P. 98–108. DOI: 10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II. ([dspace.lvduvs.edu.ua][1])
7. Kalafat, K., Vakhitova, L., Drizhd, V. Technical research and development. Boston: International Science Group, 2021. 616 p.
8. Sokolovskaya, O., Ovsianynkova, L., Stetsiuk, V., et al. Scientific foundations of modern engineering. Boston: International Science Group, 2020. 528 p.
9. Hnes, L., Kunytskyi, S., Medvid, S. Theoretical aspects of modern engineering. Boston: International Science Group, 2020. 356 p.

STUDY OF GAS RELEASE KINETICS IN MORTAR MIXTURES AND THE PROPERTIES OF NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE

The study investigates the processes of gas release and pore formation in mortar mixtures during the production of non-autoclaved aerated concrete. The research focuses on determining the influence of calcined soda, caustic soda, and mixture temperature on gas release kinetics, swelling behavior, and the physical-mechanical properties of aerated concrete. Laboratory investigations were carried out using mathematical experiment planning and statistical data processing in the STATISTICA 12 software environment. A specially developed experimental device equipped with an electronic data acquisition module was used to monitor the swelling process and analyze the onset, duration, and intensity of gas release. The results demonstrated that the temperature of the mortar mixture and additive dosage significantly influence pore structure formation and the properties of the resulting material. The use of chemical additives made it possible to intensify the swelling process, improve the quality of the porous structure, and reduce energy consumption by eliminating the need for preliminary heating of the mixture. The proposed methodology enables optimization of the composition and technological parameters of non-autoclaved aerated concrete under both laboratory and industrial conditions.

УДК 624.014.072

ЕФЕКТИВНИЙ СПОСІБ ПОПЕРЕДНЬОГО НАПРУЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ АРКОВИХ СИСТЕМ З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ МЕТАЛОЄМНОСТІ ПОКРИТТІВ БУДІВЕЛЬ

Постернак О.О., к.т.н., доцент, **Сінгаївський П. М.**, к.т.н., доцент,
Купченко Ю.В., к.т.н., доцент, **Уразманова Н.Ф.**, асистент
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Сучасний розвиток будівельної галузі супроводжується зростанням вимог до економічності, надійності та ресурсоефективності несучих конструкцій. Особливо актуальним є зменшення металоємності сталевих покриттів великих прольотів, що пов'язано зі зростанням вартості металу й енергоресурсів та необхідністю раціонального використання матеріалів [1]. Перспективним напрямом вирішення цієї задачі є застосування комбінованих аркових систем, ефективність яких визначається не збільшенням перерізів елементів, а раціональною формою та керуванням їх напружено-деформованим станом.

Комбіновані аркові системи складаються з жорсткого верхнього поясу, який працює переважно на стиск, і гнучкої решітки, елементи якої

сприймають розтяг. Така схема забезпечує диференційоване використання матеріалу: у стиснутих елементах застосовується сталь звичайної міцності, а в розтягнутих – високоміцна. Це створює умови для зменшення витрати металу без зниження надійності конструкції.

Попередні дослідження переважно були спрямовані на визначення раціональної геометрії гнучкої решітки. Встановлено, що положення точки сходження стрижнів істотно впливає на розподіл внутрішніх зусиль. За оптимальної геометрії всі елементи решітки працюють на розтяг при дії рівномірно розподілених постійних і тимчасових навантажень, що забезпечує стабільність роботи системи. Однак реальні умови експлуатації передбачають нерівномірні снігові навантаження, що можуть викликати стиск в окремих елементах решітки [2,3]. Це знижує ефективність використання матеріалу та ускладнює роботу конструкції. Отже важливим напрямом удосконалення комбінованих аркових систем є застосування попереднього напруження, яке забезпечує переважно розтягнутий стан гнучких елементів.

Традиційні способи попереднього напруження відзначаються значною трудомісткістю та потребують спеціального обладнання. Крім того, вони збільшують розрахункові навантаження і створюють фіксований рівень попереднього напруження, що не враховує зміну експлуатаційних умов.

У даній роботі розглянуто конструктивний спосіб створення попереднього напруження шляхом зміни положення одного зі стояків аркової системи. Крайній стояк пропонується виконувати похилим назовні з шарнірним закріпленням до фундаменту. Горизонтальна складова опорної реакції при цьому формує необхідні розтягувальні зусилля в решітці без застосування додаткових натяжних пристроїв. Запропоноване рішення забезпечує саморегульоване попереднє напруження. Із зростанням снігового навантаження збільшуються горизонтальні переміщення рухомої опори та кут нахилу стояка, що автоматично підвищує натяг елементів решітки. Конструкція адаптується до фактичного навантаження і працює найбільш ефективно за несприятливих умов. Додаткове підвищення ефективності досягається раціональним вибором геометрії решітки, коли допускається поява незначних стискуючих зусиль у окремих елементах від тимчасових навантажень. Попереднє напруження компенсує ці зусилля та зменшує навантаження у верхньому поясі. Перерозподіл внутрішніх сил забезпечує більш повне використання високоміцної сталі в розтягнутих елементах і зниження вимог до перерізів стислих елементів.

Розрахунковий аналіз показує, що зусилля в гнучкій решітці від попереднього напруження перевищують відповідні зусилля у верхньому поясі, що створює сприятливі умови для ресурсозберігаючого проектування. Найбільша ефективність досягається в двопролітних і круглих будівлях, де горизонтальні складові опорних реакцій взаємно врівноважуються.

Практичне застосування запропонованого підходу дозволяє спростити монтаж покриття, зменшити обсяг робіт із натягу елементів і підвищити експлуатаційну надійність будівлі. Використання конструктивно сформованого саморегульованого попереднього напруження є перспективним напрямом удосконалення сталевих покриттів великих прольотів і забезпечує зниження металоємності та підвищення ефективності конструкцій.

[1] ДБН В.2.6 – 198:2014. Сталеві конструкції. Норми проєктування. [чинні від 2022-09-01]. К.: Мінрегіон України, 2022. 220 с. (Державні будівельні норми України).

[2] ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проєктування. – [чинні від 2007-01-01]. – К.: Мінбуд України, 2006. – 75 с. (Державні будівельні норми України).

[3] Singayevsky P.M. Influence of snow loading character on optimal lattice's geometric shape of the combined arch system / P.M. Singayevsky, Y.V. Kupchenko, S.M. Chuchmay // Zbirnyk naukovykh prats «Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury», Odesa: ODABA, Vol. 70, pp. 75-79, 2018.

AN EFFECTIVE METHOD OF PRESTRESSING COMBINED ARCH SYSTEMS FOR REDUCING THE STEEL CONSUMPTION OF BUILDING ROOF STRUCTURES

The research focuses on improving the efficiency of a technical system by refining its structural solutions and operating conditions. Existing approaches are analyzed, and the main factors influencing operational performance are identified. Rational operating parameters are substantiated, and an approach to their optimization is proposed. The suggested solutions are aimed at improving technical and economic performance and can be applied in the design, modernization, and operation of relevant structures or equipment.

УДК 624.012:699.812

ОЦІНЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОЇ МІЦНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПІСЛЯ ТЕПЛОГО ВПЛИВУ МЕТОДОМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Рашкевич Н.В., д.ф., доцент

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Рашкевич О.С., к.т.н.

3-й ДПРЗ Головного управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій
у Харківській області, м. Харків

Обстеження будівельних конструкцій після пожежі є складовою оцінювання їх подальшої експлуатаційної придатності. Для залізобетонних елементів тепловий вплив супроводжується зниженням міцності бетону, розвитком мікротріщин, зміною структури цементного каменю та формуванням локальних зон пошкодження. За таких умов доцільним є застосування методів неруйнівного контролю, які дозволяють отримати інформацію про стан конструкції без відбору зразків та додаткового пошкодження матеріалу.

Питання оцінювання наслідків надзвичайних подій та пошкодження будівельних конструкцій розглянуто в низці наукових праць. У дослідженні [1] запропоновано організаційно-технічний підхід до запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного характеру на територіях, що зазнали ракетно-артилерійських уражень, що формує загальний контекст оперативного обстеження об'єктів після аварійних впливів.

У праці [2] проаналізовано пожежну небезпеку об'єктів критичної інфраструктури, зокрема з позицій можливих наслідків для будівельних конструкцій.

З проблематикою післяаварійного обстеження пов'язана робота [3], у якій розглянуто оцінювання пошкоджень будівельних конструкцій після надзвичайної події та наголошено на потребі встановленні їх фактичного технічного стану. У дослідженні [4] наведено підхід до інструментальної ідентифікації конфігурації осередку пожежі для оцінки безпеки підприємств. Праці [5,6] присвячені термічному пошкодженню бетону та застосуванню неруйнівних методів для оцінювання стану вогнем пошкоджених бетонних конструкцій. Наведені дослідження підтверджують доцільність використання інструментального контролю для встановлення просторової неоднорідності пошкодження бетону після високотемпературного впливу.

Для оцінювання стану залізобетонної конструкції застосовано метод пружного відскоку. Вимірювання виконували до та після 85-хвилинного теплового впливу у 28 контрольних точках, розміщених на різних рівнях по висоті конструкції. Така схема дала змогу визначити зміну міцності бетону як загалом по лицьовій поверхні, так і з урахуванням її просторового розподілу.

За результатами вимірювань встановлено зниження показників міцності на всіх досліджуваних рівнях. Середнє значення за всією лицьовою поверхнею зменшилося з 51,75 до 48,82 МПа, що відповідає втраті близько 5,66 %. Водночас зміни мали нерівномірний характер: поряд із ділянками незначного ослаблення були виявлені локальні зони з більш вираженим зниженням показників.

Найбільші локальні втрати досягали 17–18 %, що перевищує середнє значення для всієї досліджуваної поверхні. Найпомітніші зміни спостерігалися в середній та верхній частинах плити. Це свідчить про формування осередкової зони термічного пошкодження, а не про рівномірне зниження міцності бетону по всій площі конструкції.

Аналіз середніх значень за висотою також підтвердив локалізований характер пошкодження. Найбільше зниження було характерним для рівня 1,5 м, де воно становило 7,41 %. На інших рівнях зміни були меншими, що узгоджується з результатами поточної оцінки.

Додатковою діагностичною ознакою стало зростання просторової неоднорідності міцності. Для всієї лицьової поверхні коефіцієнт варіації збільшився з 16,04 до 17,98 %, що вказує на посилення розкиду значень між окремими контрольними точками після теплового впливу. Такий показник може використовуватися для уточнення меж ділянок із підвищеним рівнем пошкодження.

Таким чином, метод пружного відскоку може застосовуватися не лише для орієнтовного визначення залишкової міцності бетону, а й для попереднього зонування залізобетонних конструкцій після пожежі. Інформативними ознаками такого зонування є локальні мінімуми міцності, підвищена варіативність результатів і наявність групи контрольних точок із близькими показниками ослаблення.

[1]. Rashkevich N., Shevchenko R., Yeremenko S. (2025). Development of an organizational and technical method of emergency prevention of technological character on the territory which was attacked by rocket and artillery impacts. *Systems, Decision and Control in Energy VII*. Vol. 595. P. 717–747. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_33 [in English].

[2]. Hryshchenko A. A., Rashkevich N. V., Otrosh Yu. A. (2025). Аналіз пожежної небезпеки об'єктів критичної інфраструктури. [Analysis of fire hazard of critical infrastructure facilities]. *Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: НУЦЗ України. С. 27–28* [in Ukrainian].

- [3]. Stezhko D. Ye., Smyrnov A. V., Rashkevich N. V. (2025). Оцінка пошкоджень будівельних конструкцій після надзвичайної події. [Assessment of damage to building structures after an emergency event]. Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: НУЦЗ України. С. 150–151 [in Ukrainian].
- [4]. Kharchenko D. V., Zolotarova A. O., Rashkevich N. V. (2025). Інструментальна ідентифікація конфігурації осередку пожежі для оцінки небезпеки підприємств. [Instrumental identification of the fire seat configuration for assessing the hazard of enterprises]. Безпека людини у сучасних умовах: збірник доповідей XVII Міжнародної науково-методичної конференції Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, 4–5 грудня 2025 р. Харків: НТУ «ХПІ». С. 154–155. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/26736> [in Ukrainian].
- [5]. Rashkevich N., Otrosh V., Tyshchenko I., Tsvirkun S. (2025). Investigation of thermal damage and structural weakness in concrete. Key Engineering Materials. Vol. 1028. P. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-8VvCj1> [in English].
- [6]. Rashkevich N., Otrosh V., Shyogoleva M., Tyshchenko O. (2025). Evaluation of fire-damaged concrete structures using the non-destructive testing. Advances in Science and Technology. Vol. 170. P. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-h5AMzs> [in English].

ASSESSMENT OF THE RESIDUAL STRENGTH OF A REINFORCED CONCRETE STRUCTURE AFTER THERMAL EXPOSURE USING A NON-DESTRUCTIVE TESTING METHOD

The use of the rebound hammer method for assessing the residual strength of a reinforced concrete structure after thermal exposure is considered. Based on measurements at control points, uneven reduction in concrete strength and the formation of a local thermal damage zone were identified. It is shown that the combination of local strength minima and increased variability of results can be used for preliminary post-fire zoning of reinforced concrete structures.

УДК 669-155.3:539.378.6

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГКОПЛАВКИХ ПРИПОЇВ

**Протасенко Т.О., Реброва О.М.¹, к.т.н., Ребров О.Ю.¹, д.т.н.,
Васильченко О.В.³, к.т.н., Щегольова М.Г.⁴, к.м.н.**

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків

³Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

⁴Харківський національний медичний університет, м. Харків

Для підвищення надійності паяних з'єднань виробів сучасної електронної техніки, що працюють в умовах зміни температурного режиму експлуатації, необхідно мати дані про властивості матеріалу припоїв у робочому діапазоні температур. Оскільки припої знаходяться у спаї у вигляді тонкого прошарку, їх властивості можуть сильно відрізнятися від властивостей масивних матеріалів.

Дослідженню піддавались припої ПОС-61, ПОІн-52 у вигляді фольг товщиною 100-200 мкм у робочому діапазоні температур (від мінус 60 °С до плюс 100 °С), а також шаруваті композиційні матеріали, що являють собою три- і п'ятишарові листи і складаються зі свинцю, плакованого припоєм ПОІн-52. У тришаровому композиті товщина шару ПОІн-52 дорівнює 30–40 мкм, у п'ятишаровому – 20–30 мкм. Зразки досліджувалися як у вихідному, так і в відпаленому станах.

Проведений металографічний аналіз припоїв ПОС-61 та ПОІн-52 показав, що їх структура має евтектичну будову, однак структури припою ПОІн-52 у вільному стані і в складі шаруватого матеріалу різко відрізняються. Відмінним є і їх фазовий склад, що підтверджується рентгеноструктурним аналізом. Взаємодифузія компонентів приводить до утворення фаз трикомпонентної системи In–Sn–Pb.

У композиційному матеріалі у вихідному стані (після прокатування) спостерігається чітка границя між складовими шарами, а також існує вузька перехідна зона вздовж границі розділу шарів. Мікротвердість шару, яким плакують, дорівнює 60 МПа, це вище, ніж твердість припою у вільному стані (45 МПа). Збільшення мікротвердості можна пояснити зміною фазового складу припою, що підтверджується рентенографічним аналізом.

Нагрівання при 70 °С приводить до початку розмиття границь розділу шарів за рахунок посилення дифузійних процесів. Нагрівання при 155 °С

приводить до розплавлення припою (для ПОІн-52 $T_{пл}=117...118$ °С); відбувається інтенсивна дифузійна взаємодія розплаву і свинцю. Ділянки нових утворених сполук трикомпонентної системи In–Sn–Pb неоднорідні за розмірами, формою і складом.

Підвищення температури до 185 °С приводить до подальшого проникнення по границях зерен свинцю окремих частинок розплавленого припою. Таким чином, нагрівання до температур, що перевищують температуру плавлення плакованого шару, приводить до деградації шаруватої структури композита і перетворенню останнього в сплав відповідних компонентів з гетерогенною структурою по перерізу. У зразках п'ятишарових композиційних матеріалів під впливом температури нагрівання простежуються аналогічні структурні зміни.

Були встановлені основні механічні характеристики міцності та пластичності досліджуваних матеріалів. Необхідно відзначити, що для м'яких припоїв і композиційних матеріалів на їх основі деформація розтягу навіть при кімнатній температурі є гарячою деформацією ($T_{деф.} > 0,5T_{пл}$).

Характеристики міцності припою ПОІн-52 порівняно з ПОС-61 при всіх температурах випробування більш низькі, однак високий вміст індію надає припою більшу пластичність. Її величина досягає 80 %, що обумовлює застосування ПОІн-52 в умовах, де пластична деформація є вирішальною характеристикою, наприклад, при паянні матеріалів із суттєво різними коефіцієнтами термічного розширення, для паяння виробів, що працюють при негативних температурах або в режимі термоцикування.

Характеристики міцності п'ятишарових композитів трохи вищі, однак пластичність майже у два рази нижча, ніж у тришарових. Низький рівень пластичності п'ятишарових зразків призводить до недоцільності їх використання в даних умовах експлуатації. Потрібно відмітити, що характеристики міцності шарових композитів значно перевершують міцність складових, що обумовлено вирішальним впливом на механічні властивості композита міжфазних поверхонь розділу та інтенсивних дифузійних процесів у приграничних шарах. Хоча пластичність композита набагато нижче, ніж у ПОІн-52 і свинцю, вона цілком задовольняє технологічним вимогам, які пред'являються до даних припоїв.

Встановлено, що нагрівання до температури (70 ± 10) °С ($0,88T_{пл}$ припою ПОІн-52) у середовищі водню незначно впливає на механічні властивості композиційного матеріалу. Нагрівання до температури (155 ± 10) °С у середовищі водню, що на 30–50 °С вище температури плавлення припою ПОІн-52 є імітацією режиму паяння, яке, як правило, проводять при температурі, що перевищує на 30–40 °С температуру плавлення припою. Через нерівномірний розвиток фазових переходів і дифузійних процесів у зразках цієї партії спостерігається дуже великий

розкид значень усіх механічних характеристик. У цілому вони трохи знижуються, однак їх рівень задовольняє умовам експлуатації матеріалу, тому дану температуру можна рекомендувати як робочу для виконання з'єднань композиційним припоєм ПОІн-52–Pb методом паяння.

Нагрівання до температури (185 ± 10) °С у водневому середовищі проводили для вивчення можливості виконання паяння при більш високих температурах. Визначено, що таке нагрівання, яке значно перевищує температуру плавлення ПОІн-52, призводить до подальшої деградації шаруватої структури композита, незначного зниження характеристик міцності композита та до суттєвого зниження рівня пластичності, що є досить небажаним. Таким чином, використання для паяння даними припоєм температур вище 155 °С недоцільно.

Отримані експериментальні результати проведеного дослідження дозволили:

- отримати інформацію щодо залежності характеристик міцності і пластичних характеристик фольг припоїв ПОІн-52 і ПОС-61 від температури випробування, необхідну для визначення надійності роботи паяних з'єднань в умовах циклічної зміни температури;
- встановити, що механічні властивості композиційних матеріалів у вигляді свинцевої стрічки, яка плакована м'яким припоєм ПОІн-52, різко відрізняються від властивостей складових матеріалів;
- визначити температурні межі паяння композиційним матеріалом;
- показати недоцільність використання п'ятишарових композитів у заданих умовах експлуатації.

FEATURES OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF LOW-FUSING SOLDERS

The study was conducted on POIn-52 solder in the form of a foil with a thickness of 200 μm and three- and five-layer POIn-52–Pb composite materials. Data were obtained on the influence of various technological parameters on the properties and structure of solders in the free state and in the form of layered composite materials. These data are necessary for choosing the optimal soldering technology and the possibility of creating compositions using solders. The influence of the interfacial surfaces of composites and their degradation under the influence of heating is shown.

УДК 691:539.4:536.421

НЕЛІНІЙНІ ЕФЕКТИ ПРИ ЗАМЕРЗАННІ ВОДИ В ПОРАХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Рябчиков М.Л.¹, Александров О.В.², Александров М.О.²
Сичов Ю.І.²

¹Луцький національний технічний університет, Львівська вул., 75, Луцьк, 43018, Україна

²Харківський національний університет ім.В.Н.Каразіна, Університетська вул., 16, Харків,
61003, Україна

Пори в бетоні – це природні порожнини, що виникають через випаровування води та повітря в суміші, а також можуть утворюватися через неправильне ущільнення чи надлишок води, і бувають різних типів: гелеві, капілярні та повітряні. Хоча пористість надає бетону властивості (наприклад, для ніздрюватого бетону), у звичайному бетоні вони можуть призводити до поглинання вологи, замерзання води, що розширюється, та мікротріщин, що в підсумку руйнує конструкцію.

Актуальність визначення умов руйнування будівельних матеріалів при замерзанні води в порах під час змін погоди зумовлена низкою наукових, технічних та соціально-економічних чинників. більшість Будівельних матеріалів (бетон, цегла, камінь, розчини) мають пористу структуру й здатні поглинати вологу. Під час зниження температури вода в порах замерзає та збільшується в об'ємі приблизно на 9 %, що створює внутрішні напруження. Якщо ці напруження перевищують міцність матеріалу, відбувається утворення мікротріщин і поступове руйнування. Тому визначення умов, за яких ці напруження стають критичними, є ключовим для прогнозування довговічності конструкцій.

В дослідженні [1] були оцінені ризики пошкодження будівельних матеріалів при замерзанні. Була продемонстрована еволюція води при замерзанні в замкнених порах. В дослідженні [2] запропонований комплексний підхід на фактори довговічності бетону в холодному кліматі. Стаття [3] доводить провідну роль утворення льоду в порах будівельних матеріалів на процеси їх руйнування.

Мікроструктурний аналіз замерзання води в порах бетону був проведений в дослідженні [4]. Розглядалися умови визначення характеристик при морозному впливі з залученням досліджень на мікро і макроуровні.

Важливим питанням при вивченні процесів замерзання води в бетоні є дослідження проникнення рідини в пористі середовища. Була також відзначена принципова нелінійність цих процесів і запропоновані шляхи розв'язання нелінійних задач. Симуляція проходження рідини в будівельні матеріали з врахуванням їх пористості проводиться в дослідженні [5].

Мета дослідження складається в врахуванні нелінійних ефектів при розв'язанні рівнянь пружності для пористих структур з врахуванням реальних фізичних властивостей будівельних матеріалів.

Типова структура пор в бетонах показана на рис.1.

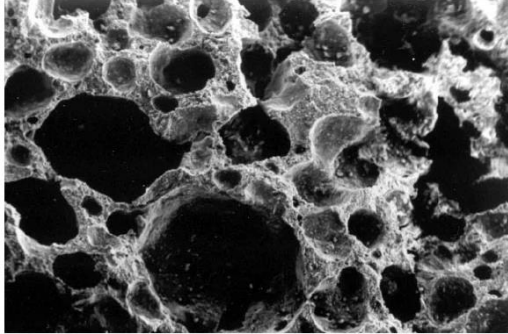


Рис.1 Типова структура пор в бетоні

Для розв'язку задач теорії пружності використовувались пружні процеси і рівняння в порожнинах. При цьому враховувались нелінійні механічні властивості будівельних матеріалів, описані в статті, а також метода розв'язку нелінійних диференційних рівнянь. Також використовувались інтелектуальні підходи створення продукції з умов створення раціональних параметрів.

При визначенні небезпечних умов функціонування будівельних матеріалів при засерзанні води в порах необхідно визначити поля механічних напружень навколо пори.

Умовну форму пори будемо розглядати у вигляді сфери, навантаженої внутрішнім тиском p . У традиційній лінійній постановці задача зводиться до відомої задачі Ляме. Для сферично симетричного випадку рівняння рівноваги приймає вигляд

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) = 0. \quad (1)$$

Для реальних будівельних матеріалів залежність між деформаціями і напруженнями має виражений нелінійний характер.

Повне рівняння діаграми (параболічний закон) може мати вигляд

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = f_{cm} \left[2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 \right], 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1}. \quad (2)$$

де ε_{c1} , f_{cm} – константи матеріалу.

Визначення умов руйнування при замерзанні води

Повністю сформульована безрозмірна задача має вигляд

$$\begin{cases} (2 - 2w')w'' + \frac{2}{\rho} \left[2 \left(w' - \frac{w}{\rho} \right) - \left((w')^2 - \left(\frac{w}{\rho} \right)^2 \right) \right] = 0 \\ 2w'(1) - (w'(1)) = -\hat{p}, w(\infty) = 0, w'(\infty) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Безрозмірний розв'язок можна шукати у вигляді ряду за оберненими

степенями радіальної координати: $w(\rho) = \sum_{k=2}^{\infty} \frac{A_k}{\rho^k}$.

Після підстановки в диференційне рівняння можна одержати рекурентну формулу для визначення коефіцієнтів

Слід відзначити основні властивості коефіцієнтів – парність, поліноміальна залежність - A_{2m} пропорційне \hat{p}^m , асимптотичний характер ряду.

Базовий розв'язок буде мати вигляд

$$w(\rho) = \frac{\hat{p}}{2\rho^2} + \frac{3\hat{p}^2}{8\rho^4} + \frac{5\hat{p}^3}{16\rho^6} + \dots \quad (4)$$

В цій формулі перший член визначає розв'язок лінійного рівняння, інші члени враховують нелінійність рівняння. Найбільш критичним при цьому буде зона на границі порожнини для $\rho=1$. Аналіз відсоткового внеску для різних рівнів тиску для різних факторів демонструє досить значний вплив нелінійних складових.

Для визначення реальних напружень в бетоні при замерзанні води необхідно врахувати деформації льду в порожнині.

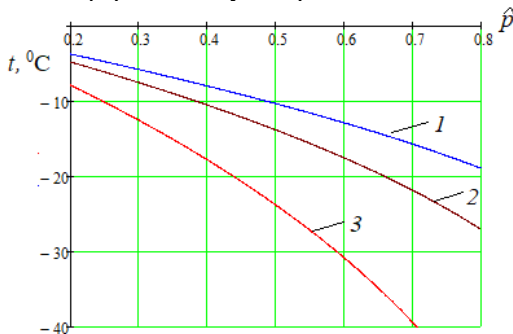


Рис. 2. Залежність питомого навантаження в порі від температури. 1 – цегла, 2 – бетон, 3 – асфальтобетон

Враховуючи ефект розширення води при замерзанні на величину $u_f = \beta \cdot a$, можна стверджувати

$$\varepsilon_c \left(\frac{\hat{p}}{2} + \frac{3\hat{p}^2}{8} + \frac{5\hat{p}^3}{16} \right) + \frac{\hat{p} \cdot f_{cm} \cdot (1 - 2\nu)}{E_0 - k \cdot t} = \beta.$$

Рис. 2 демонструє залежність питомого тиску в порі при замерзанні від температури

Критерій початку руйнування при замерзанні пори визначається з умови

$$|w'(1)| = 1, \text{ або } \left(p + \frac{3}{2} p^2 \right)^2 = 1$$

Одержана залежність дозволяє визначити небезпечні умови функціонування при замерзанні води в порах будівельних матеріалів.

[1] K. Fukui, C. Iba, Development of pore water pressure during freeze-thaw cycles in weather conditions, *Cold Regions Science and Technology*, Volume 217 (2024) 104044, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104044>.

[2] S. Guler, Z.F. Akbulut, A comprehensive review of concrete durability in freeze-thaw conditions: Mechanisms, prevention, and mitigation strategies, *Structures*, Volume 75 (2025) 108804, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108804>.

[3] Y. I. Fogue Djombou, P. Devillers, S. Corn, E. Garcia-Diaz, Role of ice formation mechanisms occurring inside stylolite on limestone tilestone frost susceptibility. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 29(1) (2025) 43–63, <https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2368144>.

[4] S. Mao, Y. Lin, Z. Yue, Microstructural analysis of freeze–thaw degradation in rubber-modified cement-stabilized crushed stone using X-ray computed tomography, *Materials Science-Poland*, v.43, no.3 (2025) 50-63, <https://doi.org/10.2478/msp-2025-0029>.

[5] Y. Sakai, Simulating water penetration in cementitious materials using pore structures from mercury intrusion porosimetry, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 22 (2025) e04492, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04492>.

NONLINEAR EFFECTS DURING FREEZING OF WATER IN PORES OF BUILDING MATERIALS

This study investigates nonlinear effects arising during the freezing of water in the pores of building materials. Porous structures such as concrete, brick, and stone absorb moisture, which expands upon freezing and generates internal stresses leading to microcracking and structural degradation. The research focuses on determining the conditions under which these stresses become critical. A nonlinear elasticity approach is applied to model stress distribution around pores, considering realistic material properties and the deformation behavior of ice. The pore is idealized as a spherical cavity subjected to internal pressure, and a nonlinear differential equation is solved using a series expansion method. The results demonstrate that nonlinear components significantly influence stress levels, especially near pore boundaries. A criterion for the onset of material failure is proposed, allowing the prediction of hazardous operating conditions. The findings contribute to improving durability assessments of construction materials in cold climates.

УДК 614.841

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ В ЗАЛІЗОБЕТОННІЙ СТІНІ ПРИ ОДНОСТОРОННЬОМУ ВПЛИВІ ПОЖЕЖІ

Сідней С.О., д.т.н., доц.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Обрана геометрія фрагмента залізобетонної стіни обґрунтовується необхідністю забезпечення відповідності досліджуваної моделі реальним конструктивним елементам будівель та умовам їх роботи за пожежного впливу. Геометричну модель створено у геометричному модулі SpaceClaim програмного комплексу ANSYS WB (рис. 1).

Товщина стіни 165 мм прийнята відповідно до вимог та рекомендацій [1–3], які регламентують мінімальні геометричні параметри для забезпечення заданого класу вогнестійкості (наприклад, REI 150) при односторонньому тепловому впливі.

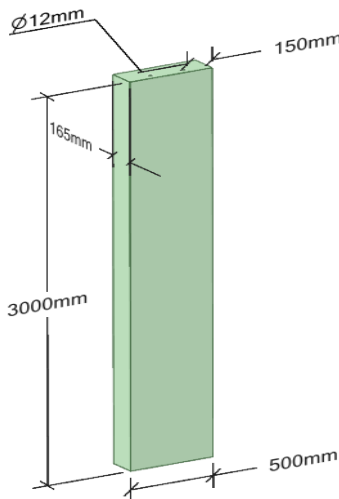


Рис. 1. Геометрична модель фрагмента залізобетонної стіни, прийнята для чисельного моделювання

Висота фрагмента 3 000 мм відповідає типовій висоті поверху будівель, що дозволяє врахувати реальні умови роботи конструкції та характер розподілу температурних і механічних впливів по її висоті.

Ширина моделі 500 мм обрана з урахуванням необхідності мінімізації крайових ефектів та забезпечення умов, наближених до роботи нескінченної пластини при дії механічного навантаження і температурного впливу.

Прикладання граничних умов. Для моделювання теплового впливу пожежі на залізобетонну стіну використано стандартний температурний режим пожежі відповідно до [4]. Температура газового середовища задавалася за стандартною температурною кривою пожежі, математичне подання якої має вигляд:

$$\vartheta = 345 \cdot \lg(8 \cdot t + 1) + 20, \quad (1)$$

де t – час, що відраховується від початку випробування, хв.

На нагрітій поверхні конструкції задано комбінований теплообмін, що включає конвективну (рис. 2а) та радіаційну складові (рис. 2б).

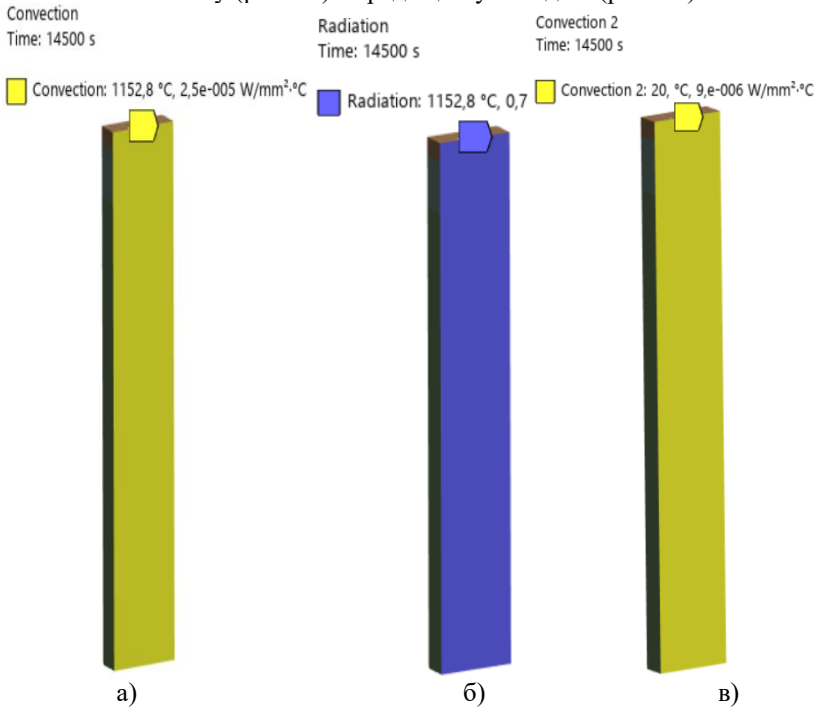


Рис. 2. Схема задання граничних умов теплового навантаження:

- а) – конвективний теплообмін на нагрітій поверхні; б) – радіаційний теплообмін; в) – конвективний теплообмін на ненагрітій поверхні

Конвективний теплообмін описується коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha = 25 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}$, що відповідає умовам теплового впливу пожежі, а

температура газового середовища змінюється відповідно до стандартної температурної кривої пожежі. Радіаційний теплообмін враховано із коефіцієнтом випромінювання $\varepsilon = 0,7$, що відповідає умовам теплового випромінювання в пожежному середовищі.

На протилежній (ненагрітій) поверхні конструкції задано конвективний теплообмін із навколишнім середовищем при температурі 20°C та коефіцієнті тепловіддачі $\alpha = 9 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ (рис. 2в), що відповідає умовам природного теплообміну з повітрям.

Бічні та торцеві поверхні моделі прийнято адіабатичними, тобто такими, через які відсутній тепловий потік. Це обґрунтовується тим, що досліджуваний фрагмент розглядається як частина протяжної стінової конструкції, для якої тепловий вплив через бокові поверхні є незначним. Такий підхід дозволяє виключити крайові ефекти та забезпечити умови, наближені до роботи протяжної стінової конструкції.

Таким чином задана система граничних умов для розв'язання теплотехнічної задачі забезпечує адекватне відтворення процесів теплопередачі в залізобетонній стіні в умовах пожежі та відповідає сучасним підходам до чисельного моделювання конструкцій при тепловому навантаженні.

Скінченно-елементна модель фрагмента залізобетонної стіни сформована із застосуванням комбінованого підходу, що включає використання об'ємних та лінійних скінченних елементів.

Бетонна частина конструкції змодельована з використанням об'ємних гексадральних скінченних елементів типу SOLID279, що забезпечують коректне відтворення температурного поля та напружено-деформованого стану конструкції в умовах термосилового впливу. Статистичні показники скінченно-елементної сітки представлені в табл. 1.

Елемент конструкції	Тип скінченного елемента	Кількість скінченних елементів (од.)	Кількість вузлів (од.)
Бетон	SOLID279	1364	7076
Арматура	лінійна	120	244
Загальна кількість	-	1484	7320

На першому етапі дослідження виконано чисельне моделювання теплового впливу пожежі на фрагмент залізобетонної стіни з метою визначення розподілу температури в конструкції.

На рис. 3 наведено розподіл температури в досліджуваній конструкції на момент часу 14 400 с дії стандартного температурного режиму пожежі. При цьому початкові 100 с розрахунку були відведені для відтворення

механічного навантаження за нормальних температурних умов без теплового впливу.

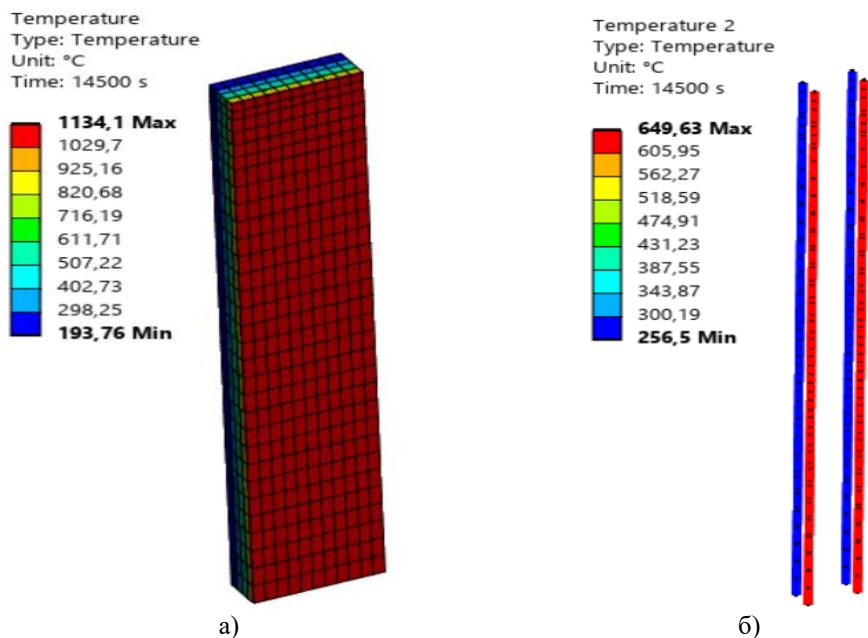


Рис. 4. Розподіл температури у фрагменті залізобетонної стіни в умовах дії стандартного температурного режиму пожежі протягом 14 400 с:
а) – температурний розподіл в бетоні конструкції; б) – розподіл температури по арматурних стержнях

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]. EN 1992-1-2 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].

[2]. BS NA EN 1992-1-2: UK National Annex to Eurocode 2. Design of concrete structures. General rules. Structural fire design.

[3]. Carrascón, S., Robert, F., & Villagrà, C. (2023). Some Highlights on the New Version of EN 1992-1-2 (Eurocode 2, Fire Part). *Hormigón Y Acero*, 74(299-300), 223-234. <https://doi.org/10.33586/hya.2023.3096>

[4]. ISO 834-1:2025(en) Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements.

STUDY OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A REINFORCED CONCRETE WALL UNDER ONE-SIDED FIRE EXPOSURE

This study investigates the temperature distribution in a reinforced concrete wall subjected to one-sided fire exposure using finite element modeling in ANSYS Workbench. A refined mesh and temperature-dependent material properties were applied to ensure accurate thermal analysis. The results demonstrate a significant temperature gradient across the wall thickness, which governs the thermal response and influences the structural performance under fire conditions.

УДК 539.3

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ УКРИТТЯ ПРИ ДІЇ ІМПУЛЬСНОГО НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ

Сідней С.О., д.т.н., доц.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Розрахункові методи оцінювання впливу імпульсних навантажень на будівельні конструкції ґрунтуються на використанні спрощених аналітичних залежностей та інженерних підходів, зокрема еквівалентних динамічних моделей. Такі підходи дають змогу визначати основні параметри напружено-деформованого стану конструкцій при дії надлишкового тиску вибухової хвилі та широко застосовуються в нормативній базі й практиці проектування.

Разом із тим, застосування цих методів, представлених у роботах [1–3], супроводжується певними обмеженнями, зумовленими необхідністю прийняття спрощених припущень щодо характеру навантаження, граничних умов та поведінки матеріалів. Це, у свою чергу, може призводити до зниження точності оцінювання реальної роботи конструкцій при дії імпульсних впливів.

Чисельне моделювання є одним із ключових інструментів дослідження реакції будівельних конструкцій при дії імпульсних навантажень і реалізується з використанням спеціалізованих програмних комплексів, зокрема LS-DYNA, AUTODYN, ABAQUS та ANSYS. Серед них LS-DYNA широко застосовується для аналізу швидкоплинних динамічних процесів, у тому числі вибухових впливів, завдяки можливості врахування нелінійної поведінки матеріалів, контактної взаємодії та значних деформацій [4].

Застосування чисельних моделей дає змогу досліджувати процеси поширення ударних хвиль, формування напружено-деформованого стану та механізми пошкодження конструкцій при імпульсних навантаженнях.

У роботі розглянуто найбільш несприятливий варіант дії імпульсного навантаження, за якого надлишковий тиск прикладається одночасно до фронтальної стіни та перекриття укриття.

Дискретизація бетонної частини виконана із застосуванням об'ємних гексадральних скінченних елементів із регулярною структурованою сіткою, що забезпечує достатній рівень точності при визначенні напружено-деформованого стану конструкції в умовах динамічного навантаження. Використання саме гексадральних елементів дозволяє більш коректно відтворювати напружений стан у порівнянні з тетрадральними елементами, особливо при аналізі задач із переважно регулярною геометрією (рис. 1).

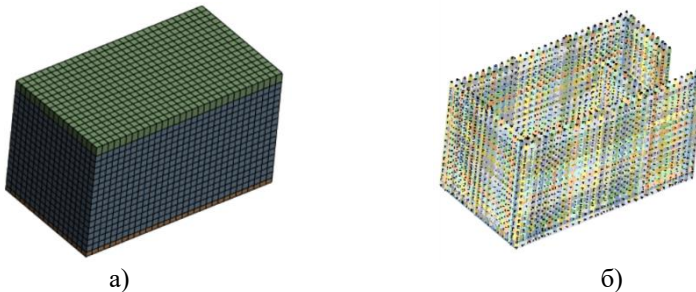


Рис. 1. Скінченно-елементна модель укриття: а) – бетонна конструкція, змодельована із застосуванням об'ємних (твердотільних) елементів; б) – арматурний каркас, змодельований з використанням лінійних елементів

Вибір типу, розміру та параметрів скінченно-елементної сітки здійснювався з урахуванням рекомендацій щодо забезпечення достовірності результатів динамічних розрахунків, наведених у роботі [5], а також із урахуванням необхідності досягнення компромісу між обчислювальною ефективністю та точністю розрахунку.

На рис. 2 наведено результати розподілу загальних деформацій

конструкції укриття при дії імпульсного навантаження у вигляді надлишкового тиску, що імітує вплив вибухового навантаження. Аналіз виконано для моменту часу 0,05 с, що відповідає завершенню дії імпульсу.

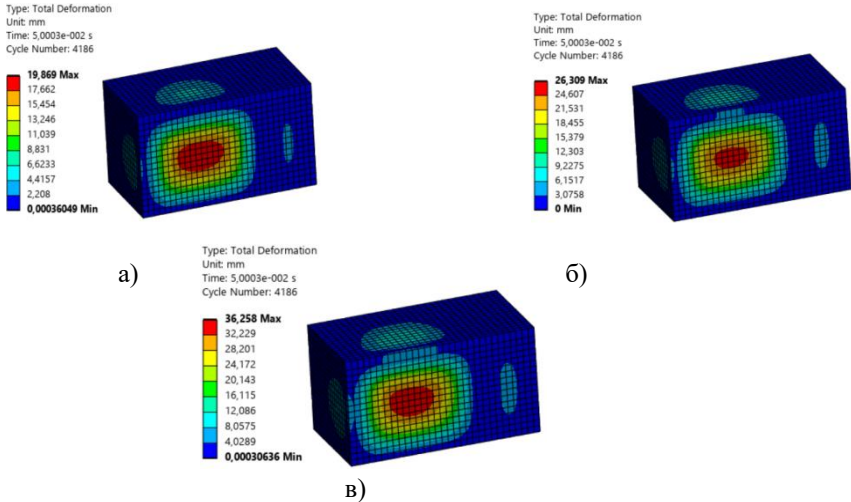


Рис. 2. Розподіл загальних деформацій укриття при дії імпульсного надлишкового тиску: а) – 50 кПа; б) – 75 кПа; в) – 100 кПа

Встановлено, що максимальні деформації локалізуються у центральній частині фронтальної стіни, яка безпосередньо сприймає дію надлишкового тиску. При цьому характер розподілу деформацій має симетричний вигляд відносно центру навантаженої поверхні, що свідчить про коректність постановки граничних умов та навантаження.

Зі збільшенням пікового значення надлишкового тиску спостерігається суттєве зростання величини деформацій. Так, для навантаження 50 кПа (рис. 2а) максимальне значення деформації становить 19,87 мм, для 75 кПа (рис. 2б) – 26,31 мм, а для 100 кПа (рис. 2в) – 36,26 мм.

Окрім фронтальної стіни, деформації також спостерігаються у зоні перекриття, однак їх величина є меншою, що пояснюється більш жорсткими умовами закріплення конструкції та просторовою роботою укриття (рис. 2).

Отримані результати свідчать про зростання деформацій зі збільшенням рівня прикладеного надлишкового тиску та підтверджують визначальну роль фронтальної стіни у сприйнятті імпульсного навантаження.

На рис. 3 наведено розподіл максимальних головних напружень у конструкції укриття при дії імпульсного навантаження у вигляді надлишкового тиску на момент часу 0,05 с.

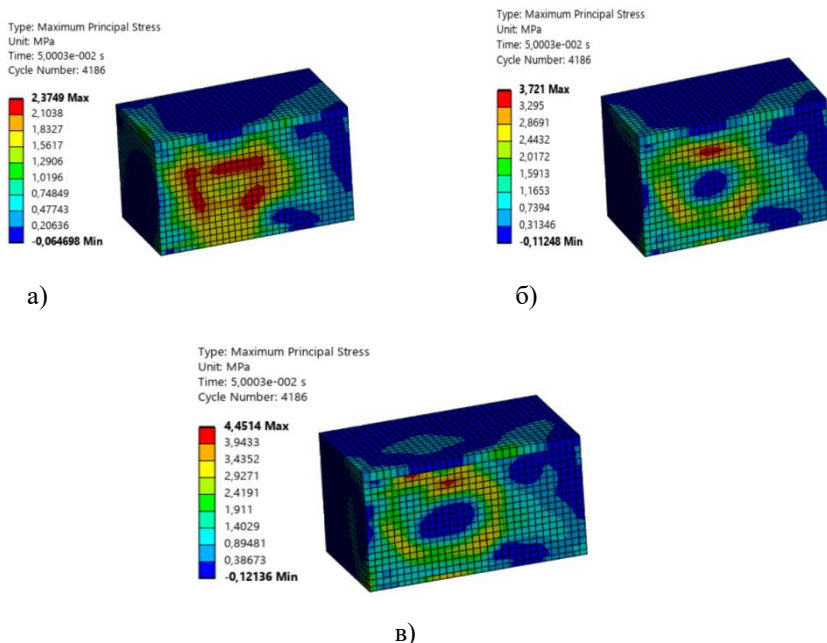


Рис. 3. Розподіл максимальних головних напружень у конструкції укрита при дії імпульсного надлишкового тиску на момент часу 0,05 с:
а) – 50 кПа; б) – 75 кПа; в) – 100 кПа

Встановлено, що найбільші значення напружень зосереджені в центральній зоні фронтальної стіни, яка безпосередньо сприймає дію навантаження, що узгоджується з характером деформування конструкції (рис. 3).

При цьому спостерігається локалізація розтягувальних напружень у вигляді концентрованих зон, які можуть розглядатися як потенційні осередки зародження тріщин.

[1]. Xuejiao Ma, Deren Kong, Yucheng Shi, Experimental and numerical investigation of blast loads induced by moving charge explosion. Structures. (2023). Vol. 47. 2037-2049. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.042.

[2]. Review of methods for prediction of internal blast loading. (2021). Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 9(2). 534-544. <https://doi.org/10.21533/pen.v9.i2.761>

[3]. Biggs J.M. Introduction to Structural Dynamics. New York: McGraw-Hill, 1964.

[4]. Li J., Hao H., Wu C. (2017) Numerical study of precast segmental column under blast loads. Engineering Structures. 134. 125–137. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.12.028.

[5]. Sidnei, Stanislav & Nozhko, Ihor & Rotar, Vasyl & Grygorian, Mykola. (2025). The Influence of a Finite Element Mesh on the Reliability of the Results of Dynamic Processes of Armor Penetration of a Steel Plate by a Bullet. Solid State Phenomena. 381. 47-58. DOI: 10.4028/p-0gmX1w.

INVESTIGATION OF THE STRESS–STRAIN STATE OF A SHELTER UNDER IMPULSE OVERPRESSURE LOADING

This study investigates the stress–strain state of a rapidly erected thin-walled shelter under impulse overpressure loading using Explicit Dynamics in ANSYS Workbench. Three loading scenarios with peak overpressure values of 50, 75, and 100 kPa were analyzed. The results show that increasing overpressure leads to higher stresses and displacements, with crack formation governed by tensile stresses in concrete.

УДК 624:012

ВИДИ ФІБРОБЕТОНУ У БУДІВНИЦТВІ Сур'янінов В.М.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Численні дослідження вчених, проведені у різних країнах, довели ефективність застосування фібробетону у сучасному будівництві. Дисперсне армування призводить до підвищення фізико-механічних характеристик матеріалу, особливо статична міцність на розтяг при згині, яка може перевищувати міцність бетонної матриці в 4-5 разів, знижуються усадкові деформації, підвищується тріщиностійкість, збільшується термін служби конструкцій. І це далеко не всі переваги фібробетону, порівняно з традиційним бетоном. Широко використовуються фібробетони, армовані місцевими матеріалами, що виготовляються або доступними в даному конкретному регіоні. Таке рішення дозволяє знизити вартість будівництва, покращити характеристики бетону та використовувати екологічно доступні компоненти. Основні види фібри з місцевих матеріалів: целюлозні волокна з деревини чи переробленого паперу; рослинні волокна - джут, коноплі, сизаль, кокосове волокно, бамбук та ін.

Але найбільший ефект досягається при використанні чотирьох типів фібри - базальтової (рис. 1, а), поліпропіленової (рис. 1, б), сталевोї (рис. 1,

в), скловолоконної (рис. 1, г). Тип фібри вибирається в залежності від умов експлуатації конструкції.

Базальтова фібра виготовляється з розплавленого базальтового каменю шляхом перетворення цього матеріалу на волокна, є екологічним, негорючим і хімічно інертним матеріалом. Має високу міцність на розтягування (1000–1100 МПа), стійкість до лужної та кислотної середовищ, вогнестійкість до +700°C, не піддається корозії. Застосовується в підземних та транспортних тунелях, паркінгах, захисних екранах, гідротехнічних спорудах.

Поліпропіленова фібра є однією з найбільш економічно доступних і найпростіших у застосуванні. Виготовляється з поліпропілену, який нагрівають і витягують в тонкі волокна. Має низьку щільність, морозостійкість і пластичність, стійкість до лужного середовища, грибків і плісняви, не піддається корозії. Застосовується для бетонної підлоги, вирівнюючих шарів, тротуарних покриттів.

Сталева фібра виготовляється із сталі високоміцних марок. Має міцність на розтяг до 1200 МПа, значно підвищує ударну і згинальну міцність, стійка до навантажень, підвищує тріщиностійкість. Застосовується для влаштування підлог, виготовлення несучих конструкцій, портових та аеродромних покриттів.

Скловолоконна фібра виготовляється з найтонших ниток лугостійкого скла з оксидом цирконію, що добре зберігає структуру в лужному середовищі. Має дуже малу щільність, міцність на розрив до 1700 МПа, гнучка і пружна. Застосовується для фасадних елементів, малих залізобетонних елементів, панелей та бордюрів, бетону з декоративною поверхнею, у штукатурних розчинах.

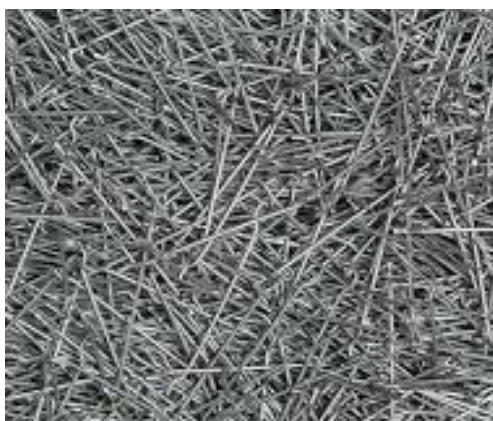
Насамкінець зазначимо, що в Одеській державній академії будівництва та архітектури вже понад 10 років проводяться комплексні дослідження механічних властивостей сталевібробетону та базальтобетону, а також виготовлених з них конструкцій.



а



б



в



г

[1]. М.Г. Сур'янінов, С.П. Неутов, І.Б. Корнеєва, Д.В. Величко. Несуча здатність сталевібробетону з фіброю різного типу. Науковий вісник ІФНТУНГ. Ів-Фр, 2020. Випуск 2(49). С. 18 – 24. <https://nv.nung.edu.ua/index.php/nv/article/view/734>

[2]. Yan, W., Shi, J., Cao, X., Zhang, M., Li, L., & Jiang, J. (2025). A Review on the Applications of Basalt Fibers and Their Composites in Infrastructures. *Buildings*, 15(14), 2525. <https://doi.org/10.3390/buildings15142525>

[3]. М. Surianinov, S. Neutov, D. Kirichenko, I. Korneeva. Fiber type influence on the reinforced concrete under axial tension. *2021 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 1162, 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012016>

TYPES OF FIBER-REINFORCED CONCRETE IN CONSTRUCTION

Numerous studies by scientists conducted in different countries have proven the effectiveness of using fiber concrete in modern construction. Dispersed reinforcement leads to an increase in the physical and mechanical characteristics of the material, especially the static tensile strength when bending, which can exceed the strength of the concrete matrix by 4-5 times, shrinkage deformations are reduced, crack resistance is increased, and the service life of structures is increased. And these are not all the advantages of fiber concrete compared to traditional concrete. Fiber concretes reinforced with local materials produced or available in a given specific region are widely used. This solution allows you to reduce the cost of construction, improve the characteristics of concrete and use environmentally friendly components. The main types of fiber from local materials: cellulose fibers from wood or recycled paper; plant fibers - jute, hemp, sisal, coconut fiber, bamboo, etc. But the greatest effect is achieved when using four types of fiber - basalt, polypropylene, steel, fiberglass. The type of fiber is selected depending on the operating conditions of the structure. The Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture has been conducting comprehensive studies of the mechanical properties of steel-fiber concrete and basalt concrete for over 10 years, as well as structures made from them.

УДК 624:012

ДИСПЕРСНЕ АРМУВАННЯ БЕТОНУ БАЗАЛЬТОВОЮ ФІБРОЮ

Сур'янінов М.Г., Кіріченко Д.О.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Розробка та виробництво фібробетонів за кордоном ведуться у широких масштабах. У нашій країні ці матеріали поки що застосовуються у невеликих обсягах і для обмеженої кількості виробів. Як показують результати численних досліджень, серед існуючих видів фіброволокон одним із найперспективніших є базальтоне волокно. Цікаво, що перші спроби застосувати базальтову фібру для дисперсного армування бетону було здійснено в нашій країні – у 1979 році співробітники Київської науково-дослідної лабораторії АН УРСР Махова М. Ф. та Гребенюк Н. П. розробили технологію отримання дешевого базальтового волокна.

Базальтова фібра - це порівняно новий неорганічний, екологічно чистий, високоефективний матеріал, зазвичай коричневого кольору із золотавим відтінком. Складається з оксидів SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , FeO та домішок, кожен компонент волокна робить свій внесок у різні властивості. Як армуючий матеріал базальтоне волокно має високу стабільність, унікальні механічні

властивості, корозійну стійкість, забезпечує високу тепло- і звукоізоляцію, а також хорошу водонепроникність.

Вогнестійкі тканини, зіткані з базальтового волокна, використовуються при виробництві вогнезахисного термозахисного одягу та протипожежних ковдр. Ці вироби в основному застосовуються у пожежній, металургійній та військовій промисловості. Базальтоне волокно є гарною заміною інших видів армуючих волокон. За своїми характеристиками базальтоне волокно мало відрізняється від вуглецевого, але коштує в кілька разів дешевше. У композитних матеріалах можна комбінувати з різними смолами для виготовлення композитів, придатних для конструкційного застосування. До них відносяться лопатки вітряних турбін, конструкції корпусів транспортних засобів та суден, корозійностійкі та стійкі до тиску трубопроводи та резервуари для зберігання, а також підкладки для друкованих плат.

Базальтова фібра може ефективно використовуватись у будівництві. Вона підвищує міцність бетону на вигин (до 50%), ударну в'язкість, морозостійкість та тріщиностійкість, запобігає усадці. Витрата становить 0,6–4 кг на 1 м³ суміші (рис. 1).

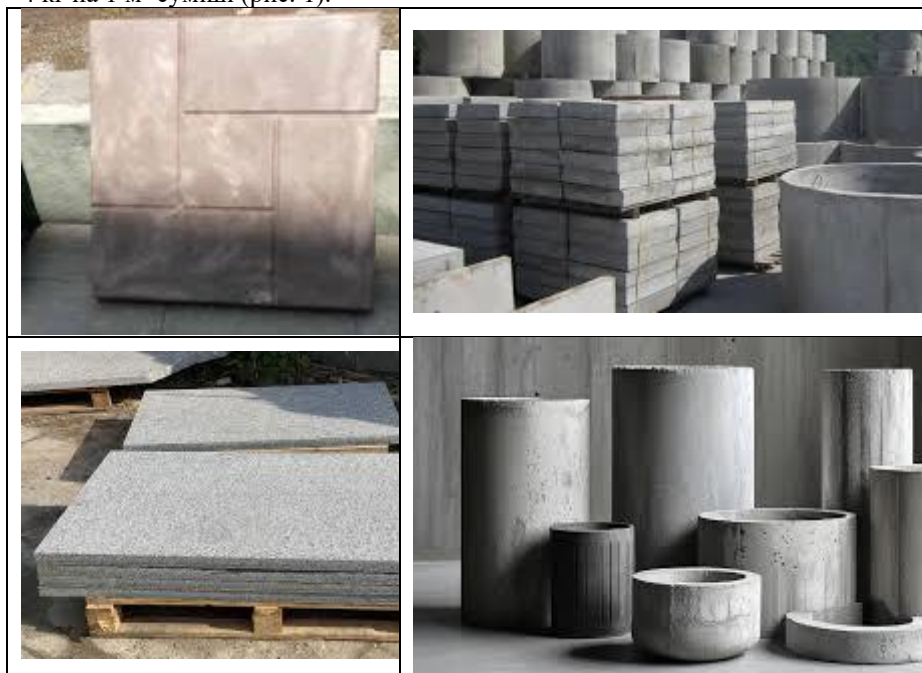


Рис. 1. Базальтобетон у будівництві

Основні сфери застосування: промислові підлоги та стяжки, у тому числі, теплі підлоги, де важливо запобігти тріщинам; дорожнє будівництво: асфальтобетонні суміші, дорожні плити, мости та шляхопроводів; бетонні вироби: тротуарна плитка, бордюри, бетонні огорожі, кільця, труби, каналізаційні споруди, кабельна та телефонна каналізація, малі архітектурні форми, пінобетон та газобетон; будівельні розчини та штукатурки, гіпсокартонні плити; гідротехнічні споруди; спеціальні конструкції: корпуси фільтрів димоочищення, теплоізоляційні матеріали для трубопроводів, ущільнення, військові споруди, сейсмостійкі конструкції, радіопрозорі об'єкти.

Найважливішими перевагами використання базальтобетону є його висока хімічна стійкість (не кородує в лужному середовищі) та вогнетривкість, стійкість до температурних перепадів.

Таким чином, можна зробити висновок про ефективність використання базальтофібробетону в будівництві та актуальність наукових досліджень у цьому напрямку.

- [1]. Zhao, X.; Wang, X.; Wu, Z.; Zhu, Z. Fatigue behavior and failure mechanism of basalt FRP composites under long-term cyclic loads. *Int. J. Fatigue* 2016, 88, 58–67.
- [2]. Li, T.; Zhu, H.; Shen, J.; Keller, T. Thermophysical and thermomechanical properties of basalt-phenolic FRP rebars under high temperature. *Constr. Build. Mater.* 2022, 342, 127983.
- [3]. Shi, J.; Wu, Q.; Li, B.; Liu, Y.; Cao, W.; Wang, H. Fatigue bond behavior of FRP-to-concrete joints with various bonding adhesives. *Eng. Struct.* 2024, 301, 117311.
- [4]. Shi, J.; Li, H.; Cao, W.; Wang, H. Fatigue behavior and bond improvement of the FRP-to-concrete interface after marine corrosion. *Eng. Struct.* 2025, 332, 120043.

DISPERSED REINFORCEMENT OF CONCRETE WITH BASALT FIBER

As numerous studies show, basalt fiber is one of the most promising among existing fiber types. As a reinforcing material, basalt fiber exhibits high stability, unique mechanical properties, corrosion resistance, provides excellent thermal and sound insulation, and good water resistance. Basalt fiber can be effectively used in construction. It improves concrete's flexural strength, impact toughness, frost resistance, and crack resistance, while preventing shrinkage. The most important advantages of basalt concrete are its high chemical resistance (it does not corrode in alkaline environments), fire resistance, and resistance to temperature fluctuations. Therefore, it can be concluded that basalt fiber concrete is effective in construction and that research in this area is highly relevant.

УДК 691:620.22:001.895:628.4

ТРАДИЦІЙНИЙ БЕТОН ТА БЕТОН ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ 3D-ДРУКУ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

Суханевич М.В., д.т.н., доцент, Чахоян В.А., аспірант
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ,

Технологія 3D-друку бетоном (3DCP) стрімко розвивається: обсяг світового ринку прогнозується понад 40 млрд USD до 2030 р. [1]. Вона виключає традиційну опалубку, автоматизує процес зведення і відкриває можливість довільних архітектурних форм. Для України, де критичною є потреба у прискореному відновленні зруйнованого житла, технологія набуває стратегічного значення [2].

Проте порівняння 3DCP із традиційним монолітним будівництвом у науковій літературі часто є вибіркоким — переважно на користь переваг 3DCP [3]. Системного аналізу принципів відмінностей у рецептурі сумішей, реологічних вимогах і повному екологічному балансі бракує.

Мета роботи — усунути цю прогалину через об'єктивне чотириохвимірне зіставлення технологій.

Фундаментальна відмінність між традиційним бетоном і 3DCP полягає у вимогах до мікроструктури і реологічної поведінки матеріалу. Традиційний бетон укладається у форму, ущільнюється вібруванням і набирає міцність у статичному стані. У 3DCP суміш повинна одночасно бути прокачуваною через трубопровід і швидко твердіти після укладання для утримання форми шару без опалубки [4].

Для забезпечення цих властивостей стандартні рецептури 3DCP передбачають підвищений вміст цементу (450–650 кг/м³) — у 1,5–2 рази більше, ніж у типовому бетоні C25/30. Обов'язковими добавками є: мікрокремнезем або зола виносу (10–20%), тиксотропна добавка, прискорювач схоплювання (1–3%) [51]. Детальне порівняння складів наведено в таблиці 1.

Технологія 3DCP висуває низку реологічних вимог, принципово відсутніх у нормативній базі традиційного бетону (EN 206, ДБН В.2.7-176). Відкритий час (20–60 хв), рання міцність ($\geq 0,35$ МПа через 20 хв) і тиксотропія ($\tau_{a0} = 0,5\text{--}2,5$ кПа) — три параметри, що визначають придатність суміші для 3DCP і є взаємно суперечливими: прискорювач

скорочує відкритий час і підвищує ранню міцність, суперпластифікатор — навпаки [6].

Таблиця 1

Порівняльний аналіз складів традиційного бетону та 3DCP

Параметр суміші	Традиційний бетон	3DCP
Вміст цементу, кг/м ³	280–400	450–650
Макс. фракція заповнювача, мм	до 40	до 4–8
Водоцементне відношення	0,40–0,60	0,32–0,45
Мікрокремнезем / зола	не обов'язково	10–20% від маси цементу
Тиксотропна добавка	не потрібна	обов'язкова
Прискорювач схоплювання	за потребою	обов'язковий (1–3%)
Типова міцність R28, МПа	20–50	30–80

На відміну від традиційного бетону, де контроль зосереджений на стадіях приготування і ущільнення, у 3DCP критичним є неперервний моніторинг реологічних параметрів у процесі друку: тиск у насосі, температура суміші, геометрія шарів (лазерний профілометр). Розробляються ML-системи зворотного зв'язку, що в режимі реального часу коригують подачу прискорювача і пластифікатора залежно від поточних реологічних показників [7].

Техніко-економічне порівняння виявляє значні переваги 3DCP за трудовитратами, швидкістю зведення та відходами матеріалів при певних обмеженнях [8]. Зведена таблиця 2 містить також показники утворення CO₂ для обох технологій бетонування.

У монолітному будівництві вартість опалубки становить 20–35% від вартості бетонних робіт (для нестандартних форм — до 60%). Повне виключення опалубки при 3DCP дозволяє реалізовувати складні геометричні форми без будь-яких додаткових витрат порівняно зі стандартними конструкціями.

Традиційна зв'язана сталева арматура не може бути розміщена автоматично у процесі пошарового друку. Поточні рішення містять: коротке волоконне армування (PP, сталеві, базальтові волокна 0,5–2%); онлайн-

укладання сталевого дроту між шарами; FRP-арматура з автоматизованою укладкою; постнапруження через передбачені канали.

Пошарова технологія укладання 3DCP обумовлює анізотропію властивостей: міцність уздовж шарів на 10–20% вища, ніж поперек, через недосконалість міжшарових зон (ITZ). Зменшення анізотропії досягається наступними кроками: скорочення часу між шарами (5–10 хв), обробка поверхні, волоконне армування.

Таблиця 2

Техніко-економічні показники та вуглецевий слід: традиційне бетонування та 3DCP

Показник	Традиційне бетонування	3DCP
Опалубка	20–35% вартості робіт	Не потрібна
Трудовитрати	100% (базові)	–60–70%
Час зведення 1 поверху (100 м ²)	30–60 робочих днів	7–14 днів
Утворення відходів	10–20%	2–8%
Геометрична свобода форм	Обмежена опалубкою	Довільна (топологічна оптимізація)
CO ₂ (стандартна суміш)	100% (база)	+10–20%
CO ₂ (3DCP + 50% промислових відходів)	100% (база)	–47%
Нормативна база	Повна (EN 206, ДБН В.2.7-176)	Формується (prEN 12390)

Стандартна суміш 3DCP через вищий вміст цементу генерує на 10–20% більше CO₂, ніж традиційний бетон. Однак гібридна суміш із 50% заміщенням клінкеру промисловими відходами (зола + шлак + мікрокремнезем) знижує CO₂ на 47% — перетворюючи 3DCP на більш екологічну альтернативу навіть без урахування переваг при відмові від опалубки [9].

Висновки. Технологія 3DCP відрізняється від традиційного бетону насамперед реологічними вимогами: відкритий час 20–60 хв, рання міцність $\geq 0,35$ МПа (20 хв), тиксотропія $\tau_0 = 0,5\text{--}2,5$ кПа. Їхнє забезпечення вимагає підвищеного вмісту цементу ($450\text{--}650$ кг/м³) та системи обов'язкових хімічних добавок.

Головні техніко-економічні переваги 3DCP: відмова від опалубки (–30–50% вартості), трудовитрати –60–70%, відходи матеріалів –40–60%, час зведення –50–65%.

Парадокс CO₂ долається при заміщенні 50% клінкеру промисловими відходами: CO₂ знижується на 47% — 3DCP стає більш екологічним варіантом порівняно з традиційним бетоном.

Ключові невирішені проблеми 3DCP: автоматизована інтеграція несучого армування, анізотропія між шарами (10–20%), відсутність нормативної бази (prEN 12390 у стадії розробки) [9].

Для України стратегічним є поєднання швидкості 3DCP для відновлення житла, вітчизняної бази BFRP-арматури (базальт) та ресурсів золи ТЕС і шлаків для заміщення клінкеру.

- [1] Grand View Research (2024). 3D Printing Construction Market Size, Share & Trends Analysis Report. San Francisco: GVR.
- [2] Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
- [3] Rahul A. V., Santhanam M., Meena H., Ghani Z. (2019). 3D printable concrete: Mixture design and fresh properties. *Cement and Concrete Composites*, 97, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014>
- [4] Nodehi M., Mohamad Taghvaei V. (2022). Sustainable concrete for circular economy: A review on use of waste glass. *Glass and Ceramics*, 78, 11–12. <https://doi.org/10.1007/s10717-022-00407-3>
- [5] Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V. N. et al. (2018). 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction. *Construction and Building Materials*, 179, 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.216>
- [6] Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- [7] Wang L., Tian Z., Ma G., Zhang M. (2020). Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar. *Cement and Concrete Composites*, 110, 103571. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103571>
- [9] European Committee for Standardization (2023). prEN 12390-13:2023 Testing hardened concrete — Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression

TRADITIONAL CONCRETE AND 3D-PRINTED CONCRETE: A COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS

A systematic comparative analysis was conducted of traditional monolithic concrete and concrete produced using 3D printing (3DCP), based on four groups of indicators: composition and mix design; rheological and technological requirements; technical and economic characteristics of the construction process; environmental footprint. The “3DCP CO₂ paradox” was identified: a standard mixture generates 10–20% more CO₂ than traditional concrete; however, when 50% of the clinker is replaced with industrial waste, the CO₂ level decreases by 47%. The 3DCP technology offers significant advantages in terms of labor costs (–60–70%), material waste (–40–60%), and construction speed (–50–65%).

УДК 624.074

ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ СТАЛЕВОГО КАРКАСУ ДЛЯ СВЕТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ ТЫЛІСЬКОГО ТОРГОВОГО ЦЕНТРУ ПО ВУЛИЦІ А.ТВАЛЧРЕЛИДЗЕ, 2

Твардовський І.О., к.т.н., доцент, Чучмай С.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

Розглянута конструкція світлопрозорого покриття в плані має форму овалу з загальними габаритами 48,0 x 19, 5м. Поперечники споруди складаються з 27 арок, прольотами від 6,73 до 19,5м з кроком 1,75м. З площини арки розкріплені системою перехресних зв'язків та розпірками. Перетин арок, розпірок та зв'язків – гнutoзварні профілі прямокутного перерізу.

Виходячи з аналізу наданого проектного рішення, арки складаються з окремих прямолінійних елементів (довжиною до 2,0м), які з'єднуються між собою на шпильках через двосторонні бічні накладки. Зв'язки шарнірно примикають до арок у місцях розташування бічних накладок (з'єднання елементів арки між собою).

Арки спираються на залізобетонні конструкції основного каркасу будівлі торгового центру та фіксуються за допомогою анкерів. До арок через

кронштейни кріпляться алюмінієві підконструкції на які спираються склопакети.

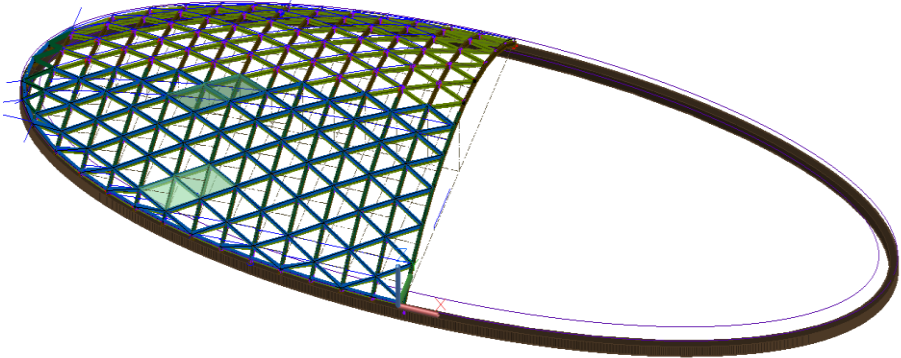


Рис. 1. Візуалізація половини купола

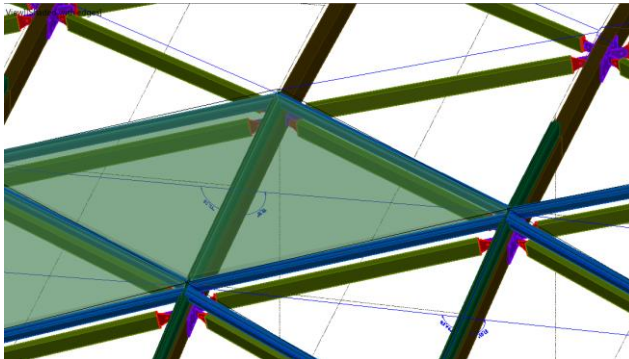


Рис. 2. Візуалізація елементів купола та їх з'єднань

З метою оцінки експлуатаційної надійності спроектованого купола будівлі торгового центру були проведені розрахунки розрахункової комп'ютерної моделі, сформованої в ПК «SCAD» Office 21.1.

На підставі проведених розрахунків були складені відповідні таблиці з результатами розрахунків (визначені внутрішні зусилля та прогини, як параметри жорсткісних властивостей).

Розрахунки споруди виконувались з наступних передумов:

- арки споруди розглядалися як нерозрізні;
- розглядалося 3 варіанти розрахункових схем:

- а) варіант 1 - Просторова розрахункова схема з двошарнірними арками – для отримання зусиль в арках з урахуванням впливу перехресної решітки, а також для отримання зусиль у зв'язках;
- б) варіант 2 - Розрахункова схема з плоскими двошарнірними арками - для отримання зусиль в арках без урахування впливу перехресної решітки;
- в) варіант 3 - Розрахункова схема з плоскими безшарнірними арками – для отримання зусиль в арках при зменшеній розрахунковій довжині, перевірки опорного вузла арки на можливість сприйняття моментів.

Для кожної із наведених схем виконувались перевірка вузла з'єднання елементів арок між собою та опорного вузла.

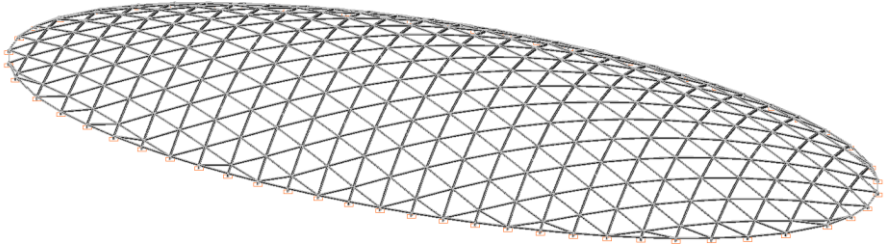


Рис.3. Просторова розрахункова схема (варіант 1)

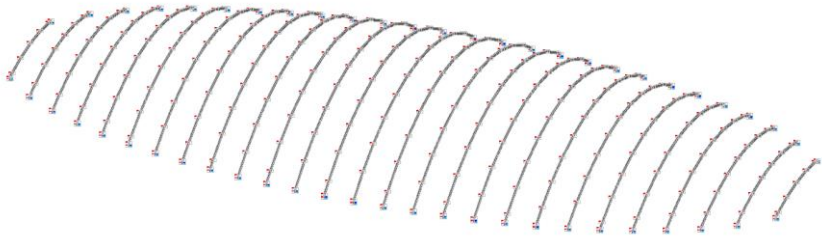


Рис. 4. Схема з окремо розташованих арок (варіанти 2, 3)

Для розрахунків застосовувався наступний перелік навантажень:

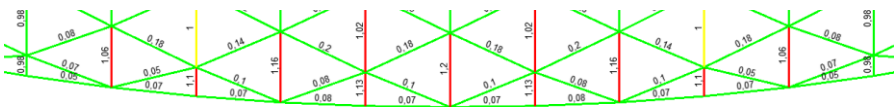
- L1 Власна вага металоконструкцій
- L2 Постійна (власна вага конструкцій покриття)
- L3 Тимчасові (світильники, елементи декору та інш.)
- L4 Снігове рівномірне навантаження
- L5 Снігове нерівномірне навантаження (збільшений сніг на лівій половині споруди)
- L6 Снігове нерівномірне навантаження (збільшений сніг на правій половині споруди)
- L7 Вітрове навантаження вздовж осі Y (+) поперек споруди

L8 Вітрове навантаження вздовж осі Y (-) поперек споруди
L9 Вітрове навантаження вздовж осі X вздовж споруди.

Основні висновки, які отримані на підставі виконаних розрахунків. Конструктивна схема споруди, яка закладена у проєкті не дає можливості остаточно визначитись з розрахунковою комп'ютерною моделлю, тому розглядається три можливих варіанти.

По варіанту 1

Коефіцієнти використання окремих елементів арок C1...C5 за критерієм стійкість у площині дії моменту при позакентровому стиску (стисненні з вигином) перевищують допустимі.



Загальні вертикальні переміщення не перевищують нормативні значення.

По варіанту 2

Коефіцієнти використання окремих елементів арок C1...C5 за критерієм стійкість у площині дії моменту при позакентровому стиску (стисненні з вигином) перевищують допустимі.



По варіанту 3

Коефіцієнти використання елементів арок не перевищують допустимі.

Найбільш близькою по роботі даної конструкції є рішення купола із плоских двохшарнірних арок, розкріплених із площини перехресними решітками. За такої розрахункової схеми частина центральних арок має збільшені напруження за критерієм стійкість у площині дії моменту при позакентровому стисканні, а гнучкості арок у площині найбільшої жорсткості перевищують нормативну.

У розглянутих розрахунках усі навантаження на арку прикладені як симетричні рівномірно розподілені. Розрахунковими є зусилля, отримані від несиметричних снігових та вітрових навантажень.

Рішення з'єднання елементів арки на бокових накладках не забезпечує нерозрізність конструкції, що робить її геометрично змінюваною. Несуча здатність болтових з'єднань з наведеними накладками недостатня для сприйняття моментних зусиль в арках.

У опорних вузлах арок відсутні додаткові конструктивні заходи передачі розпірних зусиль. За наявності тільки анкерних болтів можливе зминання бетону.

Несуча здатність елементів в'язів між арками та їх кріплень забезпечена. На підставі наведених вище висновків за результатами виконаних розрахунків надано конструктивне рішення щодо посилення металоконструкції каркасу куполу, яке забезпечило умови нерозрізності арок та передачу розпору в опорних вузлах.

При всіх розглянутих варіантах граничні переміщення вузлів конструкції куполу не перевищують нормативних значень.

1. ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження та впливи». К., 2006.

2. ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проєктування». К., 2014

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.

ASSESSMENT OF THE OPERATIONAL RELIABILITY OF THE STEEL FRAME FOR TRANSPARENT STRUCTURES OF THE TBILISI SHOPPING CENTER AT A.TVALCHRELIDZE STREET, 2

In order to assess the operational reliability of the designed dome of the shopping center building, calculations were carried out using a computational computer model generated in the SCAD Office 21.1 PC.

УДК 624.074

ВПЛИВ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНОГО ПОКРИТТЯ НА СТІЙКІСТЬ НЕТОНКИХ АНІЗОТРОПНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ПРИ БОКОВОМУ ТИСКУ

Трач В.М., д.т.н., проф., Хоружий М.М., к.т.н., доц.,

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

Подворний А.В., д.т.н., проф.,
Warsaw University of Life Sciences, Poland

Сучасний розвиток авіаційно-космічної техніки, безпілотних літальних і підводних апаратів супроводжується постійним зростанням вимог до їх несучої здатності, жорсткості та довговічності при одночасному зменшенні маси. Одним із ефективних конструктивних рішень для таких систем є використання композитних оболонок обертання, які характеризуються високими питомими міцнісними та жорсткісними характеристиками. Особливого поширення набули анізотропні оболонки, виготовлені методом намотування, оскільки зміна кута орієнтації армувальних волокон дозволяє цілеспрямовано змінювати механічні властивості конструкції залежно від характеру навантаження.

Для оболонкових композитних конструкцій одним із визначальних граничних станів є втрата стійкості під дією бокового тиску, що може виникати значно раніше за досягнення граничної міцності матеріалу [1, 2]. У зв'язку з цим важливим напрямом підвищення ефективності таких конструкцій є використання функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ) як зовнішніх захисно-підсилюючих шарів. Завдяки плавній зміні фізико-механічних характеристик за товщиною ФГМ дозволяють зменшити концентрацію міжшарових напружень, підвищити жорсткість конструкції та покращити її опір втраті стійкості [3–5].

Водночас застосування функціонально-градієнтних покриттів супроводжується збільшенням маси конструкції, що є критичним для авіаційно-космічних систем та безпілотних апаратів. Тому актуальним є визначення такого співвідношення товщини функціонально-градієнтного шару та базової композитної оболонки, за якого забезпечується найбільш ефективне підвищення стійкості при мінімальному прирості маси.

Метою роботи є дослідження впливу відносної товщини функціонально-градієнтного покриття на критичний зовнішній тиск нетонких анізотропних циліндричних оболонок та визначення раціональної товщини покриття за критерієм масової ефективності.

Дослідження виконано із застосуванням методу скінченних елементів у програмному комплексі Abaqus та адаптованої методики розрахунку

стійкості нетонких анізотропних оболонок на основі уточненої теорії оболонок типу Тимошенка–Міндліна [6, 7]. Розглядалася нетонка циліндрична оболонка довжиною $L = 1200$ мм, радіусом серединної поверхні $R = 600$ мм та товщиною $h = 30$ мм, для якої відношення $h/R = 1/20$ відповідає класу нетонких оболонок (рис. 1). Навантаження задавалося у вигляді рівномірно розподіленого зовнішнього тиску.

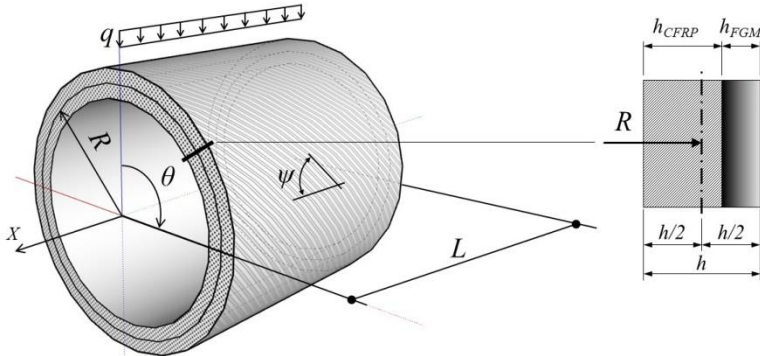


Рис. 1. Схема анізотропної циліндричної оболонки під боковим тиском

Матеріалом базової оболонки прийнято вуглепластик T700-12K Carbon fiber/Ероху. Як матеріал функціонально-градієнтного покриття розглядалася металокерамічна система Al/SiC, що складається з алюмінієвої матриці та карбиду кремнію. Зміна фізико-механічних характеристик за товщиною ФГМ-шару описувалася лінійним законом розподілу. Для чисельної реалізації функціонально-градієнтний шар дискретизувався на десять квазіізотропних підшарів однакової товщини.

На першому етапі дослідження проаналізовано вплив кута армування композитної оболонки на величину критичного зовнішнього тиску. Встановлено, що орієнтація армувальних волокон істотно впливає на параметри втрати стійкості оболонки. Зі збільшенням кута армування спостерігається зростання критичного тиску, а максимальні значення для багатшарових схем армування досягаються при $\psi \approx 70^\circ$. При цьому різниця між мінімальними та максимальними значеннями критичного тиску становить майже чотири рази.

Порівняння результатів, отриманих методом скінченних елементів та за адаптованою методикою на основі теорії Тимошенка–Міндліна, показало їх добру узгодженість. Максимальна розбіжність результатів не перевищує 6,1 %, що підтверджує достовірність запропонованого підходу та можливість його використання для дослідження складних багатшарових оболонкових конструкцій із функціонально-градієнтними покриттями.

Дослідження впливу кількості шарів намотування показало, що збільшення кількості підшарів сприяє підвищенню критичного зовнішнього тиску. Це пояснюється зменшенням мембранно-згинального взаємозв'язку та більш рівномірним перерозподілом напружень за товщиною конструкції. Для багат шарових схем армування при $N_{sl} \geq 16$ подальше збільшення кількості підшарів практично не впливає на величину критичного тиску, що свідчить про наближення конструкції до квазіоднорідного ортотропного матеріалу.

Основну увагу в роботі приділено дослідженню впливу відносної товщини функціонально-градієнтного шару h_{FGM}/h на стійкість та масові характеристики оболонки. Аналіз результатів показав, що збільшення товщини ФГМ-покриття призводить до суттєвого підвищення критичного зовнішнього тиску. Зокрема, при зміні параметра h_{FGM}/h від 0 до 1 критичний тиск зростає від 16,5 до 51,6 МПа. Однак таке підвищення стійкості супроводжується значним збільшенням маси конструкції — від 209 до 394 кг.

З метою оцінювання ефективності використання функціонально-градієнтного покриття запропоновано коефіцієнт масової ефективності, який враховує співвідношення між приростом критичного навантаження та приростом маси конструкції. Запропонований критерій дозволяє оцінювати доцільність застосування ФГМ не лише за показниками міцності чи стійкості, але й з урахуванням масових характеристик конструкції.

Аналіз отриманих результатів показав, що максимальне значення коефіцієнта масової ефективності досягається при відносній товщині функціонально-градієнтного шару $h_{FGM}/h \approx 0,1$. У цьому випадку приріст критичного зовнішнього тиску значно випереджає приріст маси оболонки. Подальше збільшення товщини ФГМ-шару супроводжується поступовим зниженням коефіцієнта масової ефективності, оскільки збільшення маси починає переважати над ефектом підвищення стійкості.

Встановлено, що найбільш раціональний діапазон відносної товщини функціонально-градієнтного покриття для досліджуваних оболонок знаходиться в межах $h_{FGM}/h \approx 0,1-0,3$. Саме у цьому інтервалі забезпечується найбільш ефективне співвідношення між підвищенням критичного зовнішнього тиску та приростом маси конструкції.

Отримані результати доцільно використовувати при проектуванні оболоноквих конструкцій авіаційно-космічної техніки, безпілотних літальних і підводних апаратів, які працюють в умовах дії зовнішнього бокового тиску.

[1]. Weaver P. M., Driesen J. R., Roberts P. Anisotropic effects in the compression buckling of laminated composite cylindrical shells. *Composites Science and Technology*. 2002. Vol. 62, No. 1. P. 91–105. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00186-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00186-5).

[2]. Shen K.-C., Yang Z.-Q., Jiang L.-L., Pan G. Buckling and Post-Buckling Behavior of Perfect/Perforated Composite Cylindrical Shells under Hydrostatic Pressure.

Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, No. 2. P. 278. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10020278>.

[3]. Koizumi M. FGM activities in Japan. Composites Part B: Engineering. 1997. Vol. 28, No. 1-2. P. 1–4. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(96\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(96)00016-9).

[4]. Reddy J. N. Analysis of functionally graded plates. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2000. Vol. 47, No. 1-3. P. 663–684. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(20000110/30\)47:1/3<663::AID-NME787>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(20000110/30)47:1/3<663::AID-NME787>3.0.CO;2-8).

[5]. Shen H.-S. Functionally Graded Materials: Nonlinear Analysis of Plates and Shells. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 282 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420092578>.

[6]. Трач В. М., Подворний А. В., Хоружий М. М. Деформування та стійкість нетонких анізотропних оболонок: монографія. К: Каравела, 2019. 274 с.

[7]. Трач В.М., Семенюк М.П., Хоружий М.М. Стійкість нетонких тришарових анізотропних циліндричних оболонок під дією зовнішнього тиску. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2018. №72, С. 73–81.

[8]. Barbero E. J. Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus®. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2023. 571 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003108153>.

EFFECT OF A FUNCTIONALLY GRADED COATING ON THE BUCKLING OF MODERATELY THICK ANISOTROPIC CYLINDRICAL SHELLS UNDER EXTERNAL PRESSURE

The paper investigates the buckling of moderately thick anisotropic cylindrical shells with a functionally graded coating subjected to external pressure. The study is motivated by the widespread application of composite shell structures in aerospace engineering and unmanned aerial and underwater vehicles, where high buckling resistance and low structural weight are critical design requirements.

The objective of the study is to evaluate the influence of the relative thickness of a functionally graded layer on the critical external pressure of anisotropic shells and to determine the optimal coating thickness based on a mass-efficiency criterion.

The analysis was performed using the finite element method implemented in Abaqus combined with an adapted computational approach based on the refined Timoshenko–Mindlin shell theory. A cylindrical shell made of T700-12K carbon fiber/epoxy composite with an external Al/SiC functionally graded coating was considered.

The results showed that the fiber winding angle significantly affects the critical external pressure, with the maximum critical pressure achieved at $\psi \approx 70^\circ$. Increasing the relative thickness of the functionally graded layer leads to a considerable increase in the critical external pressure but also increases the structural mass. To evaluate the efficiency of the coating, a mass-efficiency factor relating the increase in critical load to the increase in shell mass was introduced. The maximum value of this factor was obtained at $h_{FGM}/h \approx 0.1$. The optimal relative thickness range of the functionally graded coating was determined as $h_{FGM}/h \approx 0.1–0.3$, providing the most efficient balance between stability enhancement and mass increase.

УДК 624.191: 539.3

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІДЗЕМНИХ ТУНЕЛЬНИХ СПОРУД ВІД ДІЇ БІЧНОГО ТИСКУ

**Трач В. М., д.т.н., проф., Подворний А. В., д.т.н., проф.,
Літницький В. І., аспірант**

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

Стрімкий розвиток транспортної та інженерної інфраструктури зумовлює потребу у будівництві підземних тунельних споруд, які експлуатуються під впливом складних навантажень від ґрунтового масиву, транспортних потоків та інших зовнішніх факторів. Одним із ключових чинників, що визначає надійність і довговічність таких конструкцій, є опір бічному тиску ґрунту, під дією якого формується складний напружено-деформований стан оболонки тунелю, що потребує детального вивчення.

Бічний тиск ґрунту має складну природу та включає дві основні складові — вертикальну та горизонтальну [1, 2], які відрізняються за величиною, напрямком дії та характером впливу на конструкцію. Вертикальна складова обумовлена вагою ґрунтового масиву, тоді як горизонтальна визначається умовами бокового розширення ґрунту та його взаємодією із підземною спорудою. Така дія складових тиску, що відрізняються за напрямком, призводить до нерівномірного розподілу напружень і деформацій у оболонці тунелю.

Аналіз існуючих підходів до визначення напружено-деформованого стану (НДС) підземних споруд показує, що традиційні методи, засновані на класичних або уточнених теоріях розрахунку оболонок, не завжди дозволяють повною мірою врахувати характер роботи конструкції та особливості розподілу їх параметрів напружено-деформованого стану [3, 4]. Вказане може призводити до неточностей у визначенні напружень та деформацій, що впливає на безпеку експлуатації споруд.

У роботі запропоновано підхід, що базується на застосуванні модифікації варіаційного принципу Ху – Васідзу [5] до отримання тривимірних співвідношень теорії пружності. Вказані залежності дозволяють більш точно описати роботу циліндричної оболонки тунельної конструкції під дією бічного тиску. Зменшення розмірності отриманої системи диференціальних рівнянь проводиться при використанні процедури розділення змінних із застосуванням аналітичного методу Бубнова – Гальоркіна, а саме: всі компоненти напружено-деформованого стану

представляються у вигляді подвійних рядів Фур'є. При цьому вздовж твірної оболонки функції НДС задовольняють граничним умовам на торцях, а також враховується їх періодичність в колітовому напрямку. Отримана одновимірна система однорідних диференціальних рівнянь розв'язується чисельним методом дискретної ортогоналізації [3].

Практичне значення отриманих з використанням запропонованого підходу результатів полягає у можливості їх використання при проектуванні та будівництві підземних тунельних споруд, що сприятиме підвищенню їх надійності, безпеки та ефективності експлуатації в умовах дії складних навантажень. Застосування просторової постановки задачі дозволяє отримати більш точні та обґрунтовані результати, що достовірніше відображають реальну роботу конструкції.

[1]. Zhang, J-L., Schlappal, T., Yuan, Y., Mang, H.A. and Pichler, B. The influence of interfacial joints on the structural behavior of segmental tunnel rings subjected to ground pressure. *Tunnelling Underground Space Technol.* 84 (Feb), 2019: 538–556.

[2]. Young, W.C., Budynas, R.G. *Roark's Formulas for Stress and Strain*, vol. 7 McGraw-Hill, New York, 2002.

[3]. Баженов В.А. Нелінійне деформування, стійкість і закритична поведінка анізотропних оболонок: Монографія. / Баженов В.А., Семенюк М.П., Трач В.М. К.: Каравела, 2010. 352 с.

[4]. Трач В.М. Деформування та стійкість нетонких анізотропних оболонок: Монографія. / Трач В.М., Подворний А.В., Хоружий М.М. – К.: Каравела, 2019. 274 с.

[5]. Semenyuk, M.P., Trach, V.M., Podvornyi, A.V. Stress–Strain State of a Thick-Walled Anisotropic Cylindrical Shell. *International Applied Mechanics.* 59 (1). 2023.

DETERMINATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF UNDERGROUND TUNNEL STRUCTURES UNDER THE ACTION OF LATERAL PRESSURE

The work is devoted to the study of the stress-strain state of underground tunnel structures under the action of lateral pressure. It is taken into account that the lateral pressure of the soil includes two main components - vertical and horizontal, which differ in magnitude, direction of action and nature of the impact on the structure. The vertical component is determined by the weight of the soil mass, while the horizontal component is determined by the conditions of the lateral expansion of the soil and its interaction with the underground structure. The work proposes an approach based on the application of a modification of the Hu - Wasidzu variational principle to obtain three-dimensional relations of the theory of elasticity for the calculation of cylindrical shell structures. The specified dependencies allow a more accurate description of the operation of the cylindrical shell of the tunnel structure under the action of lateral pressure. The dimensionality of the resulting system of differential equations is reduced using the procedure for separation of variables using the analytical method of Bubnov-Galerkin. The resulting one-dimensional system of homogeneous differential equations is solved numerically by the discrete orthogonalization method.

УДК 539.3

ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОДІВ МІЖ ДВОМА П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Ходанен Т.В., к. ф.-м. н., доц., Лобода К.В., аспірант

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро,

Вступ. Застосування електродів в електронних пристроях відіграє ключову роль для їх ефективного функціонування, оскільки електричні поля прикладаються саме через внутрішні або зовнішні електроди. Особливо важливим є використання електродів у поєднанні з п'єзоелектричними матрицями, які можуть бути структурними елементами п'єзоелектричних сенсорів та актуаторів. Дуже часто електроди є набагато жорсткішими від матриць, тому з метою побудови математичної моделі, найбільш прийнятної для аналітичного дослідження, їх вважають абсолютно жорсткими. Це в більшості випадків адекватно відображає основні особливості деформування таких конструктивних елементів.

Сучасні сфери використання п'єзоелектричних матеріалів і важливість електродів, зокрема карбонових, для створення електронних пристроїв, представлено в роботі [1]. Методи дослідження однорідних п'єзоелектричних матеріалів з тріщинами та електродами проаналізовано в статті [2].

Постановка та метод розв'язання задачі. Розглянемо систему абсолютно жорстких електродів $a_1 \leq x_1 \leq b_1, a_2 \leq x_1 \leq b_2, \dots, a_n \leq x_1 \leq b_n, x_3 = 0$ між двома напівнескінченими керамічними просторами $x_3 > 0$ і $x_3 < 0$. Електроди можуть мати довільну довжину і довільне розташування. Обидва напівпростори мають клас симетрії $6mm$ і поляризовані у напрямку осі x_3 [3]. Замкнена система рівнянь п'єзостатики за відсутності масових сил і вільних зарядів у загальному випадку описується рівняннями [3]:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\varepsilon_{kl} - e_{kij}E_k; D_i = e_{ikl}\varepsilon_{kl} + \chi_{ik}E_k; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}); E_i = -\varphi_{,i}, \quad i, j, k, l = 1, 3, \quad (2)$$

де u_i – компоненти вектора переміщень; $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – компоненти тензорів напружень та деформацій; E_i – компоненти вектора електричного поля; D_i – компоненти вектора електричної індукції; φ – електричний потенціал; кома означає похідні по відповідним координатним змінним.

Вважаємо, що всі зовнішні впливи не залежать від координати x_2 , тому можна розглядати задачу плоскої деформації в площині (x_1, x_3) . Тобто можна

вважати $u_2 = 0$, $\sigma_{12} = 0$, $\sigma_{23} = 0$, $\varepsilon_{12} = 0$, $\varepsilon_{23} = 0$, $E_2 = 0$, $D_2 = 0$. Позначимо через $L' = \bigcup_{k=1}^n (a_k, b_k)$ множину електродів, а через $L'' = (-\infty, \infty) \setminus L'$. Припустимо, що електроди можуть бути електрично зарядженими, і сумарний електричний заряд поперечного перерізу електрода $a_k \leq x_1 \leq b_k$, $x_3 = 0$ в площині (x_1, x_3) дорівнює D_{0k} .

У роботі [4] було отримано наступне представлення:

$$u_3'(x_1, 0) - m_{j_4} E_1(x_1, 0) + i m_{j_1} u_1'(x_1, 0) = F_j^+(x_1) + \gamma_j F_j^-(x_1), \quad (3)$$

де $F_j(z)$ – функції, аналітичні у всій площині (x_1, x_3) за виключенням електродів. З його використанням сформульовано задачу Діріхле-Рімана:

$$F_j^+(x_1) + \gamma_j F_j^-(x_1) = u_{30}' - m_{j_4} E_{10} + i m_{j_1} u_{10}' \quad (j=1,3,4) \text{ для } x_1 \in L', \quad (4)$$

яку розв'язано аналітично при відповідних умовах на нескінченності. З використанням отриманого розв'язку знайдено аналітичні вирази для напружень і електричних зміщень на гранях електродів, а також переміщень та електричного потенціалу поза електродами. Для чисельної ілюстрації розглянуто частковий випадок взаємодії трьох електродів. Проаналізовано випадки силового навантаженого середнього електрода та електричного заряду на ньому. Отримано графіки зміни напружень та електричного зміщення на всіх електродях.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, грант № 2025.07/0117.

- [1]. Parton V. Z., Kudryavtsev B. A.: Electromagnetoelasticity. Gordon and Breach Science Publishers, New York. 1988. 526 p.
- [2]. Sekhar M.S., Veena E., Kumar N.S., Naidu K.S.B., Mallikarjuna A., Basha D.S. A Review on Piezoelectric Materials and Their Applications. 2023. V. 58, Issue2. 2200130.
- [3]. Zhang T.Y., Gao C.F. Fracture behavior of piezoelectric materials. Theor. Appl. Fract. Mech. 2004. V. 41. P. 339–379. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2003.11.019>.
- [4]. Лобода К.В., Ходанен Т.В. Вплив жорсткого електрода, розташованого на межі поділу пружного біматеріалу, на його деформування. Механіка та математичні методи. 2025. VII/2. С. 101-115. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2025-7-2-101-115>.

ON PECULIARITIES OF ELECTRODE SYSTEM DEFORMATION BETWEEN TWO PIEZOELECTRIC MATERIALS

Plane deformation of two dissimilar piezoelectric half-spaces with a system of rigid electrodes at the interface is considered. Electrodes can be subjected to a certain load and an internal electric field and an electric charge can be also specified. Due to the representation of mechanical and electrical factors through a piecewise-analytical function, the problem of linear relationship for this function is obtained and analyzed. Due to the obtained solution, analytical expressions for all electromechanical factors are found. For numerical illustration, a case of three electrodes is considered. The cases of a mechanically loaded middle electrode and an electric charge on it are analyzed. The graphs of stresses and electric displacement on all electrodes are presented.

УДК 614.842

ВСТАНОВЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИФУЗІЇ ВОДИ ПРИ ЗАХИСТІ ДЕРЕВИНИ ГІДРОФОБІЗУВАЛЬНОЮ СУМІШШЮ

**Цапко Ю.В., д.т.н., проф., Цапко О.Ю., PhD, ст. досл., доц.
Бондаренко О.П., к.т.н., доц., Бердник О.Ю., к.т.н., доц.
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ**

Деревина є одним із найбільш поширеним будівельним матеріалом, оскільки є поновлюваним будівельним матеріалом та має безліч позитивних властивостей. Однак при експлуатації під дією атмосфери змінюється стабільність геометричних розмірів та стійкість до по жолоблення і набряку, що спонукає до необхідності в додатковій обробці. Сильна гігроскопічність деревини значно скорочує термін її служби.

Таким чином захисне оброблення знижує чутливість деревини до впливу вологи та біологічного пошкодження та розширює сферу використання будівельні конструкції з деревини. Тому експлуатаційна надійність і ефективність деревини залежить від класу умов експлуатації об'єкта, а також, від якості та реакційної здатності захисного засобу.

Захист дерев'яних виробів необхідний і для споруд, які експлуатуються в різних температурних умовах. Інколи для підвищення рівня експлуатації деревини в умовах зміни температурно-вологісних режимів використовуються водорозчинні композиції, які легко вимиваються з деревини. Що приводить до по жолоблення та набрякання конструкцій і як наслідок обмеження терміну їх експлуатації. Застосування екологічно безпечних речовин на основі сумішей масла та парафіну потребує проведення досліджень з визначення стійкості до умов експлуатації середовища. Окрім того, постає необхідність вивчення механізму захисту деревини такою сумішшю від дії вологи, що стає необхідністю для отримання інформації про характер теоретичних уявлень, які відбуваються при експлуатації, що, суттєво обмежує масштаби і перспективи використання наведених матеріалів [1-5].

Тому дослідження, що направлені на визначення параметрів дифузії води при захисті деревини сумішшю масла і парафіну, є актуальними.

У результаті моделювання отримані рівняння регресії та побудовані тернарні поверхні змін вихідного параметру в залежності від змін факторів варіювання (рис. 1).

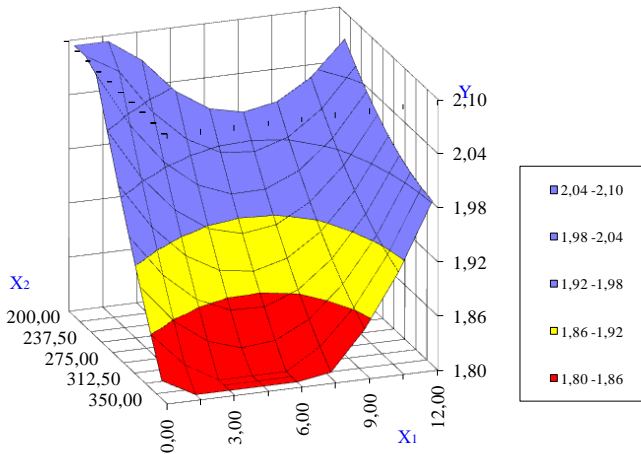


Рис. 1. Тернарні поверхні змін вихідного параметру в залежності від змін факторів варіювання витрати суміші при обробленні

Рівняння регресії:

$$Y_{\text{розрах}} = 1,877 + 0,008X_1 - 0,117X_2 + 0,123X_1 X_1 + 0,018X_2 X_2 + 0,073X_1 X_2. (1)$$

На основі проведеного комп'ютерного моделювання визначено найкраще значення показника, що забезпечує виконання поставленої задачі, а саме найменше значення водопоглинання деревини, яке отримано при витраті гідрофобізатора 270 г/м^2 та кількості скипидару у суміші близько 5%.

Тому дослідження щодо визначення властивостей гідрофобізованої деревини проводили у наступній пропорції: 72 % олія, 20 % парафін, 5 % скипидар та 3 % хлорпарафін, яку наносили на деревину (рис. 2). Загальна витрата гідрофобізатора складала приблизно $270 \dots 280 \text{ г/м}^2$.

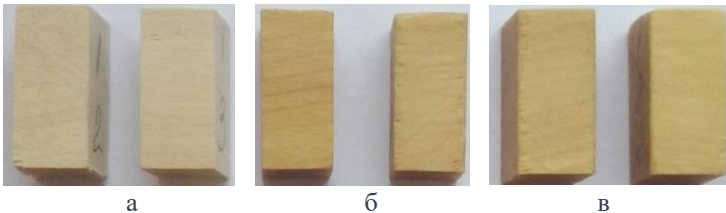


Рис. 2. Зразки для випробувань на поглинання води деревиною сосни: а – необроблений; б – оброблений сумішшю гідрофобізатора на основі лляної олії; в – оброблений сумішшю гідрофобізатора на основі ріпакової олії

Після сушіння та витримування протягом 12 діб, зразки деревини з отриманим покриттям випробовувалися на поглинання води.

На рис. 3 наведені результати дослідження процесу гальмування гідрофобізатором процесу водопоглинання зразків деревини.

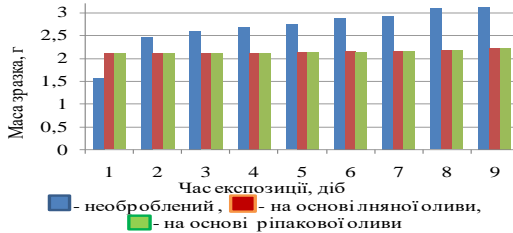


Рис. 3. Результати водопоглинання зразка гідрофобізованої деревини протягом часу експозиції годин: 1 – вихідний; 2 – 2,4; 3 – 24; 4 – 48; 5 – 72; 6 – 144; 7 – 216; 8 – 312; 9 – 480

Аналіз результатів проведених експериментів щодо поглинання води деревиною показує, що максимальний приріст маси для необробленого дерев'яного зразка становив 43,7 %, а приріст маси зразків деревини, що оброблена гідрофобізувальними сумішами на основі льняної олії, становив 4,54 %, а для суміші на основі ріпакової олії – 4,95 %, відповідно.

За методикою з урахуванням значення товщини плівки $\delta=0,2$ мм розраховано коефіцієнти дифузії води через шар гідрофобізатора, а за рівнянням коефіцієнт масопереносу у деревині, яка гідрофобізована, значення яких приведено на рис. 4.

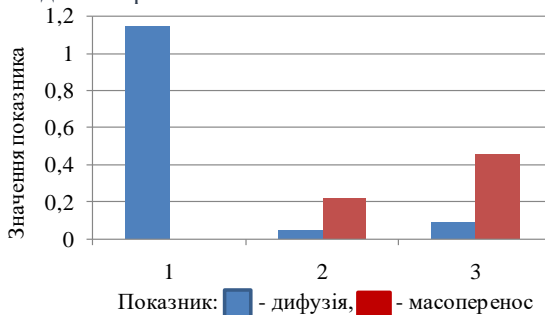


Рис. 4. Результати розрахунку коефіцієнта дифузії води та інтенсивності масопереносу під час поглинання води деревиною: 1 – необроблена деревина; 2 – гідрофобізована деревини сумішшю на основі льняної олії; 3 – гідрофобізована деревини сумішшю на основі ріпакової олії

Встановлено, що застосування покриття з гідрофобізувальної суміші на поверхні виробу з деревини, зменшує у понад 12 разів процес дифузії води. Такий покриття у значній мірі підвищує термін експлуатації деревини та дозволяє застосовувати її на об'єктах з підвищеною вологістю.

Аналіз результатів експериментів з поглинання води деревиною показує, що максимальний приріст маси для необробленого зразка деревини склав 43,7 %, а приріст маси зразків деревини обробленої гідрофобізувальними сумішами на основі льняної олії склала 4,54 %, і для суміші на основі ріпакової олії – 4,95 % відповідно. Встановлено, що застосування покриття з гідрофобізувальної суміші на поверхні виробу з деревини утворює стійкий еластичний захисний шар та зменшує процес дифузії води понад 12 разів.

[1]. Y. 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 02034 (2018). DOI: 10.1051/mateconf/201823002034.

[2]. Y. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko, Research of the efficiency of the fire fighting roof composition for cane, Materials Science Forum, 968 (2019) 61–67. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.968.61.

[3]. V.D. Núñez-Retana, M.A. González-Tagle, H. González-Rodríguez, M.I. Yáñez-Díaz, W. Himmelsbach, Prominent wood protection methods, Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 15 (84) (2024) 155–175. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1441>.

[4]. D. Angelski, K. Atanasova, Water Permeability and Adhesion Strength of Bio-based Coating Applied on Wood/Vodopropusnost i adhezivna čvrstoća biopremaza nanesenoga na drvo, Drvna Industrija, 75 (1) (2024) 43–48. DOI: 10.5552/drvind.2024.0118.

[5]. Yu. Tsapko, V. Lomaha, O. Bondarenko, M. Sukhanevych, Research of mechanism of fire protection with wood lacquer, Materials Science Forum, 1006 (2020) 32–40. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.32.

DETERMINATION OF WATER DIFFUSION PARAMETERS WHEN PROTECTING WOOD WITH OF HYDROPHOBIZING MIXTURE

The problem of using wood and wood products for building structures is to ensure their stability and durability during operation within wide limits. Therefore, the object of research was inhibition of the process of water absorption by pine wood. It was proved that during the exposure of water to wood, the maximum weight increase for an untreated wood sample was 43.7%, and the weight increase of wood samples treated with hydrophobizing mixtures based on linseed oil was 4.54%, and for a mixture based on rapeseed oil – 4.95%, respectively. The mechanisms of the process of water isolation during the transfer of moisture through the shell have been established, which makes it possible to influence this process. The obtained dependencies allow us to obtain a change in the dynamics of the growth of material moisture during exposure to water. It has been established that the application of a coating made of a hydrophobic mixture on the surface of a wooden product forms a stable elastic protective layer and reduces the process of water diffusion by more than 12 times.

УДК 621.396.6

ВИКОРИСТАННЯ У МАТЕМАТИЧНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ МЕХАТРОННИХ МОДУЛІВ РУХУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ХАРТЛІ ПРИ ВІБРОАКУСТИЧНОМУ АНАЛІЗІ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ГУСЕНИЧНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН

**Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П.,
Остапушенко О. П., Бондар С.А.**

Київський національний університет будівництва і архітектури

Проведений аналіз вібрацій асинхронних двигунів (АД) гусеничних машин у динамічних режимах їх роботи. Такий підхід є новим етапом у сфері дослідження віброакустичних параметрів електричних машин. Існуючий апарат моделювання вібрацій при роботі АД в усталених режимах не дозволяє цілком коректно проводити розрахунки динамічних режимів. До таких режимів відносяться наступні: реверс, несподіваний накид навантаження та інші. Динамічні режими характерні короткотривалістю з яскраво вираженими початком і кінцем, а також несподіваним підвищенням рівнів вібрації та шуму. Ці обставини дозволяють розглядати динамічні режими на основі теорії імпульсних процесів із застосуванням відповідного математичного апарату, який включає й спектральні методи.

У даній роботі розглянута методика розрахунку віброакустичних характеристик АД у процесах пуску. Для розрахунків обґрунтована й прийнята модель, яка базується на представленні АД механічною системою з одним ступенем вільності руху, яка збуджується неперіодичною імпульсною силою. Використання перетворень Фур'є та Хартлі дозволяє визначити вплив конструктивних та електромагнітних параметрів АД на віброактивність останнього у перехідних режимах роботи й виробити рекомендації щодо їх вибору. До цих параметрів відносяться активні опори обмоток статора і ротора, власні індуктивності та взаємна індуктивність обмоток статора й ротора, момент інерції мас, що обертаються, відстань між амортизаторами й кут розміщення опор. За допомогою методів класичного варіаційного числення визначені режими функціонування АД гусеничних машин у перехідних процесах (пуск, гальмування, реверс та ін.), котрі мінімізують небажані коливні процеси (їх характеристики), що неминуче виникають на етапах входження (чи виходу) ад у (з) нормального усталеного режиму роботи.

1. Шумілов Ю.А. Магнітні вібрації асинхронних двигунів. - автореферат дисертації доктора технічних наук. Харків: вид-во ХПІ, 1980. 47 с.
2. Герасимчук В.П. Метод розрахунку електромеханічних перехідних процесів асинхронних двигунів.// Регульовані асинхронні двигуни. Київ: вид-во Інституту електродинаміки НАН України, 1997. 146- 151 с..
3. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
4. Отнес Р., Сноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
5. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли. М.: Мир, 1990. 175 с.

**APPLICATION OF THE HARTLEY TRANSFORM IN THE
MATHEMATICAL MODELING OF MECHATRONIC MOTION
MODULES FOR THE VIBROACOUSTIC ANALYSIS OF DYNAMIC
OPERATING MODES OF ASYNCHRONOUS MOTORS IN TRACKED
CONSTRUCTION MACHINERY**

An analysis of the vibrations of asynchronous motors (AMs) in tracked machinery under dynamic operating conditions has been conducted. This approach represents a new stage in the study of the vibroacoustic parameters of electric machines. Existing vibration modeling tools for AMs operating in steady-state modes do not allow for entirely accurate calculations of dynamic modes. Such modes include the following: reverse operation, unexpected load surges, and others. Dynamic modes are characterized by short duration with clearly defined beginnings and ends, as well as unexpected increases in vibration and noise levels. These circumstances allow dynamic modes to be analyzed based on the theory of impulse processes using appropriate mathematical tools, which include spectral methods. This paper presents a methodology for calculating the vibroacoustic characteristics of an electric motor during startup processes. For the calculations, a model has been developed and adopted that is based on representing the electric motor as a mechanical system with a single degree of freedom, excited by a non-periodic impulse force. The use of Fourier and Hartley transforms allows determining the influence of the motor's structural and electromagnetic parameters on its vibration activity during transient operating modes and developing recommendations for their selection.

These parameters include the active impedances of the stator and rotor windings, the self-inductances and mutual inductance of the stator and rotor windings, the moment of inertia of the rotating masses, the distance between the dampers, and the angle of the impedances. Using methods of classical variational calculus, the operating modes of the traction drive of tracked vehicles during transient processes (starting, braking, reversing, etc.) have been determined, which minimize undesirable oscillatory processes (their characteristics) that inevitably arise during the stages of the AC motor entering (or exiting) normal steady-state operation.

УДК 621.396.6

МЕТОДИ ДИНАМІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КЕРОВАНОГО РОЗГАЛЬМУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ ПІДЙОМУ КРАНІВ З МЕХАТРОННИМИ СИСТЕМАМИ УПРАВЛІННЯ ПРИ СКИДАННІ ВАНТАЖІВ

**Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П.,
Остапущенко О.П., Бондар С.А.¹**

Київський національний університет будівництва і архітектури

У процесах експлуатації різноманітних кранів з мехатронними системами управління (гусеничних пневмоколісних на спеціальних шасі автомобільного типу автомобільних залізничних та інших), із вантажозахоплюючими органами, а саме грейдером, кліщовим захватом електромагнітом клин бабою а також при швидкій установці вантажу на опору має місце режим роботи механізму підйому при якому виникає миттєве або майже миттєве звільнення піднятого вантажу в результаті чого виникають небажані коливання самої кранової системи. У цих випадках кран зазнає у момент звільнення вантажу поштовхів у бік противаги, при цьому виникають коливання та значні динамічні навантаження на елементи крана що може призвести до втрати його стійкості. У статті запропонований режим руху крану що забезпечується мехатронною системою управління вмонтованою у нього котра дозволяє суттєво знизити коефіцієнт динамічних навантажень та амплітуду коливань при скиданні вантажу за рахунок керування процесом розгальмування гальма механізму підйому крана, регулювання термінів розгальмування використовуючи спеціальні енергосилові критерії якості таких рухів. У вказаних критеріях фігурують ефективні моменти (сил ваги крана, сил пружності, сил енергії, сил утримуючих від сили ваги крана) та їх похідні по часу вищих порядків. Кут текучого нахилу крану при його навантаженні визначається із використанням динамічної моделі методом рівноваги а його закон зміни у часі який його похідних по часу вищих порядків мінімізується згідно методів класичного варіаційного числення (із застосуванням методу сплайн-функцій по часу) протягом саме терміну гальмування крану. У результаті процес зміни положення самого крану при такому керованому скиданні вантажу може бути без виникнення динамічного навантаження та коливань при застосуванні відповідних пристроїв механічної системи управління для гасіння коливань вантажопідйомного крана. Використання методу віртуальних переміщень рівності робіт сил утримуючих і перекидаючих дозволяє встановити регульований термін розгальмування механізму підйому крана при скиданні вантажу за різних значень маси крана та вантажів.

1. Будівельні крани (конструкції, технічні характеристики, марки, вибір та експлуатація). / Л.А. Хмара, М.П. Колісник, А.Ф. Шевченко, О.І. Голубченко, М.Г. Маліч. Дніпропетровськ: ІМА-прес, 2015. 356 с.
2. ДСТУ ISO 4310-94 Крани вантажопідіймальні. Правила і методи випробувань. Київ Держстандарт України, 1994. 22 с
3. Испытание и исследование башенных стреловых кранов./ Заключительный отчет. Тема №108. № гос.регистрации 018700034991, Днепропетровск, 1998. 76с.
4. Колісник М.П., Заяць Г.В., Червоноштан А.Л. Гасіння коливань вантажопідіймного крана при скиданні вантажу. Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро, 2018. С.2 1-22.
5. РД 22-145-85 Краны стреловые самоходные. Нормы расчёта устойчивости против опрокидывания. М. 1986. 27 с
6. НПАОП 0.00-1.01-07 правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъёмных кранов. Харьков. «Форт» 2007. 256с.
7. Ананьев А.А. Колебания несущих канатов кабельных кранов при разгрузке.// Тезы докл. Ленинградской конференции по динамике подъёмно-транспортных машин. М.: Машиз. 1955. С.64-67.
8. Куйбуда Г.Г. Кабельные краны. М.; Машиностроение, 1998. 288 с.
9. Колісник М. П., Шевченко А. Ф., Червоноштан А. Л. Обґрунтування керованого розгальмування механізму підйому крана при "скиданні" вантажу// Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. 2019. №107. С.145-157.
10. Патент України на корисну модель. Колодкове гальмо/ Колісник М.П., Шевченко А.Ф., Червоноштан А.Л., заявники та власники (власник) ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури". №102279, бюл. №20, 2015. 2 с.
11. Патент України на корисну модель. Колодкове гальмо/ Колісник М.П., Шевченко А.Ф., Червоноштан А.Л., заявники та власники (власник) ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури". №106550, бюл. №8, 2016. 4 с.

METHODS FOR THE DYNAMIC OPTIMIZATION OF CONTROLLED DECELERATION IN CRANE HOISTING MECHANISMS EQUIPPED WITH MECHATRONIC CONTROL SYSTEMS DURING LOAD LOWERING

During the operation of various cranes equipped with mechatronic control systems (crawler-type, pneumatic-wheeled, mounted on special automotive-type chassis, road-rail, and others), equipped with load-handling devices—namely, a grader, a grapple, an electromagnet, a wedge, or a block—as well as during rapid placement of the load onto a

support, the hoisting mechanism operates in a mode where the lifted load is released instantly or nearly instantly, resulting in undesirable oscillations of the crane system itself. In these cases, at the moment the load is released, the crane experiences jolts toward the counterweight, causing oscillations and significant dynamic loads on the crane components, which can lead to a loss of stability. This article proposes a crane motion mode controlled by a mechatronic control system integrated into the crane, which significantly reduces the dynamic load factor and the amplitude of oscillations during load release by controlling the deceleration process of the crane hoisting mechanism's brake, and by regulating the braking release times using special energy-force quality criteria for such movements. These criteria include effective moments (crane weight forces, elastic forces, energy forces, and forces counteracting the crane's weight) and their higher-order time derivatives. The current tilt angle of the crane under load is determined using a dynamic model via the equilibrium method, and its time-varying law—along with its higher-order time derivatives—is minimized according to classical variational calculus methods (using the time-dependent spline function method) precisely during the crane's braking period. As a result, the process of changing the crane's position during such controlled load release can occur without dynamic loading or oscillations when appropriate mechanical control system devices are used to dampen the crane's oscillations. The use of the virtual displacement method, based on the equilibrium of the holding and overturning forces, allows for the establishment of a controllable deceleration time for the crane's lifting mechanism during load unloading for various values of the crane's and loads' masses.

Keywords: *dynamic optimization, lifting crane, braking torque, dynamic control loads, crane structure vibrations, load drop, variational calculus, time-dependent spline functions.*

UDK 624.04

EVALUATING THE BIODEGRADATION OF WOOD-POLYMER COMPOSITES THROUGH LONGITUDINAL PHYSICO-MECHANICAL ANALYSIS

Chystiakov Artem, PhD

Department of Materials Engineering and Physics, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Bratislava, Slovakia

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Linnaeus University, Växjö, Sweden

Kirichenko Daria, PhD

Department of Building Mechanics, Institute of Civil Engineering, Odessa State Academy of Civil Engineering, Odessa, Ukraine

Janka Kovacikova, PhD

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Linnaeus University, Växjö, Sweden

Wood-based polymer composites (WPC) represent a sustainable class of raw materials composed of softwood fibres and various polymers, such as polylactic

acid (PLA), polyurethane, and other fossil-based polymers. Polylactic acid and lignin, as well as wood fibre, are typically derived from forestry and wood-processing industry by-products [1]. Due to the natural origin and properties of their components, PLA-lignin WPCs are biodegradable under specific environmental conditions.[1]. These characteristic positions these composites as sustainable alternatives to conventional polymers, potentially reducing the long-term accumulation of plastics and microplastics. Furthermore, wood-based PLA composites are suitable for additive manufacturing that includes large-scale AM applications comparable to traditional WPCs used in the production of furniture and structural building components.

However, the biodegradation rates of PLA WPCs have not been sufficiently studied to substantiate claims of absolute sustainability. According to the studies [2], the biodegradability of polylactic acid is possible under the special temperature and humidity conditions, which were determined using accelerator methods. Nevertheless, these properties are insufficient to classify the material as inherently sustainable, as it is not currently capable of complete decomposition when released into the natural environment. The addition of wood fibres and lignified cells to the PLA matrix may improve the biodegradability of the material. Moreover, it is valuable to access the real-time combustion of the material without using accelerator methods. Consequently, this study aims to evaluate the decomposition potential of the wood-based polylactic-acid composite (using the commercially available composites DuraSense® 3D S50 Flex K and UPM Formi 3D20/19) in a natural environment in real time without the use of accelerated methods.

The most appropriate method for conducting such an assessment is soil composting under natural conditions, without exposing samples to any chemical or physico-mechanical influence to accelerate decomposition. Assessing the biodegradation of wood and polymers under the natural conditions is most often carried out by burying samples in open soil or in laboratory conditions, recreating the effect of a natural environment [3]. The experimental procedure is governed by the EN ISO 17556:2019 standard [4]. To determine the extent and rate of biodegradation, the test samples are subjected to periodic evaluation of their physical-mechanical properties and which are then compared against control samples.. This comparative approach allows for a conclusion about the progress of the biodegradation process and an assessment of its rate. Key performance indicators include changes in mass, dimensions, and density, alongside tensile strength assessments and microstructural analysis. Within the experiment, wood-based polylactic-acid composite specimens manufactured using the large-scale additive manufacturing, measuring $250 \times 40 \times 4.3$ mm (Fig. 1), were produced [5]. For comparative evaluation, in addition to the PLA WPC specimens, similarly sized wood specimens from pine (*Pinus sylvestris* L) and specimens on wood fibre and polyurethane – a potentially non-biodegradable material – were also used. The

samples were buried in natural forest soil, that had undergone no chemical or thermal pretreatment, thereby preserving the indigenous microflora and fauna. . The specimens and soil were placed in 30-litre transparent plastic containers to allow assessing soil moisture and internal processes. Consistent moisture levels were maintained to support natural biological activity. Basil (*Ocimum basilicum*) saplings were planted within each container to serve as bio-indicators of soil hydration, guiding a precise and appropriate watering regime.

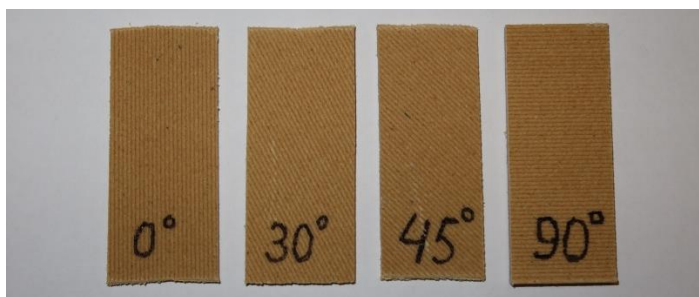


Fig. 1. Specimens used for research

As a part of the current experiment, samples are planned to be extracted from the soil and tested for physical and mechanical properties every three months. It is planned to determine changes in mass and size, which will allow for the determination of changes in their density. To characterize the dynamics of mechanical degradation, tensile strength is evaluated at three-month intervals. For this purpose, the tensile strength of the control samples was tested at the age of 0 months (before the start of the experiment) and subsequently tested every three months. To ensure statistical accuracy and mitigate measurement error six samples were tested in each phase of the test, with the average value then determined. Additionally, after each three-month stage, the samples are analysed using an optical and scanning electron microscope to assess changes in pore size distribution, as well as other microstructural processes. The duration of this experiment is initially planned for two years; the experiment may be extended if necessary. Thus, as a result of the experiment, the long-term dynamics of changes in the mass, size, density, strength and microstructure of PLA WPC samples subjected to composting will be obtained in increments of 3 months.

[1]. Shi K, Liu G, Sun H, Weng Y. Poly(lactic Acid)/Lignin Composites: A Review. *Polymers*. 2023; 15(13):2807. <https://doi.org/10.3390/polym15132807>.

[2]. Ramaux, Johan, Isabelle Ziegler-Devin, Arnaud Besserer, and Cécile Nouvel. 2024. “3D Printing of Wood Composites: State of the Art and Opportunities.” *Polymers*.

Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI),
<https://doi.org/10.3390/polym16192827>.

[3]. Joanna Barton-Pudlik, Krystyna Czaja, Marek Grzymek, Jacek Lipok. Evaluation of wood-polyethylene composites biodegradability caused by filamentous fungi. International Biodeterioration & Biodegradation, Volume 118, 2017, Pages 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.01.014>.

[4]. EN ISO 17556:2019. Plastics—Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in soil by measuring the oxygen demand in a respirometer or the amount of carbon dioxide evolved. European Committee for Standardization, Brussels (2019).

[5]. Chystiakov, A., Ziada, O.A.Q., Ahmed, S.A. et al. Experimental Evaluation of Characteristics in Large-Scale 3D-Printed Structures from Wood-Based Polymer Composites. Appl Comp Mater 33, 83 (2026). <https://doi.org/10.1007/s10443-026-10457-2>.

ВИЗНАЧЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО РОЗКЛАДУ ДЕРЕВИННО-ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ ШЛЯХОМ ОЦІНКИ ЗМІН ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Це дослідження презентує аналіз біологічного розкладу деревинно-полімерних композитів, зокрема тих, що складаються з полілактидної кислоти, лігніну та деревних волокон. Хоча ці матеріали походять із відновлюваних джерел і вважаються біорозкладними за певних умов, їхня фактична швидкість розкладання в природному середовищі залишається недостатньо вивченою. У дослідженні підкреслюється, що полімери з полілактидної кислоти зазвичай потребують контрольованих температури та вологості для ефективної біодеградації, що обмежує можливість вважати їх абсолютно екологічними матеріалами. Для вирішення цієї задачі запропоновано довготривалий експеримент із компостуванням у ґрунті в природних умовах із використанням комерційного композиту. Періодична оцінка фізичних, механічних і мікроструктурних властивостей дозволить дослідити розкладання в реальному часі без прискорених методів. Порівняння з деревиною та небіорозкладними матеріалами підсилить результати дослідження.

УДК 539.3

КОНТАКТ ПРУЖНОГО ТІЛА З ЖОРСТКОЮ МІКРОТЕКСТУРОВАНОЮ ОСНОВОЮ ЗА ВИСОКОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ІНТЕРФЕЙСУ

Чумак К.А., к.ф.-м.н., ст.н.с.

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

Неідеальність теплового контакту суттєво впливає на температурні поля та термонапружений стан тіл, що взаємодіють. Розрізняють два граничні випадки неідеального контакту спряжених поверхонь [1, 2]: модель

високопровідного інтерфейсу (HC-type interface) та модель низькопровідного інтерфейсу (LC-type interface), яка еквівалентна моделі контактного термоопору. При переході через інтерфейс у першому випадку температура є неперервною, а нормальна компонента теплового потоку має розрив. У другому випадку, навпаки, температура зазнає розриву, тоді як нормальна компонента потоку залишається неперервною.

У цій праці розглядається термопружний контакт ізотропного півпростору S_1 , плоска межа якого має високу поздовжню теплопровідність k , з абсолютно жорсткою ізотермічною основою S_2 (рис. 1). Поверхня основи текстурована періодичною системою пологих тунельних виїмків ширини $2b$ та глибини $r(x)$ ($r(x) \ll 2b$, $r'(\pm b + kd) = 0$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$).

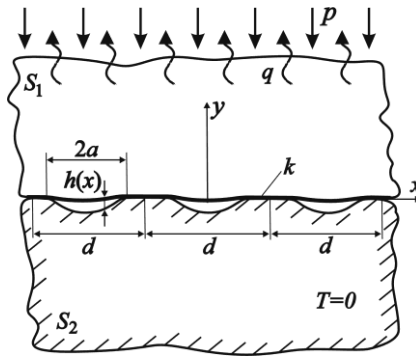


Рис. 1. Схема контакту тіл

Пружне тіло S_1 притискається до нерухомої основи S_2 рівномірно розподіленими на нескінченності зусиллями інтенсивності p . Крім того, в півпросторі S_1 на безмежності задано стаціонарний тепловий потік густини q , спрямований в додатному напрямку осі y . Припускається, що в тілі S_1 реалізується стан плоскої деформації.

Внаслідок початкової регулярної текстури межі пружного тіла на інтерфейсі виникають періодично розташовані зазори, висота $h(x)$ та ширина $2a$ яких є невідомими й залежать від прикладеного термомеханічного навантаження. Міжконтактні зазори вважаються теплоізолюваними, а їх поверхні – вільними від напружень. Без обмеження загальності покладемо, що температура жорсткої основи дорівнює нулю.

Матеріал пружного тіла характеризується коефіцієнтом

теплопровідності λ , коефіцієнтом лінійного теплового розширення α , модулем Юнга E та коефіцієнтом Пуассона ν .

Використовуючи модель високопровідного інтерфейсу, контактнотрансмісійні умови для тіла S_1 на лінії $y=0$ в межах періоду d запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} & \text{на ділянці зазору } (|x| < a): \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = k \frac{\partial^2 T(x, 0)}{\partial x^2}; \quad \sigma_{yy}(x, 0) = 0, \quad \sigma_{xy}(x, 0) = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

зовні зазору ($a \leq |x| \leq d$):

$$T(x, 0) = 0; \quad \sigma_{xy}(x, 0) = 0, \quad u_y(x, 0) = \begin{cases} r(x), & a < |x| < b, \\ 0, & b \leq |x| \leq d. \end{cases} \quad (2)$$

Тут T – температура, σ_{yy} , σ_{xy} – компоненти тензора напружень; u_y – компонента вектора переміщень у напрямку осі y .

За допомогою методу функцій міжконтактних зазорів [3], сформульовану контактну задачу зведено до сингулярного інтегродиференціального рівняння (СІДР) з ядром Гільберта відносно температури $T(x) = T(x, 0)$ межі пружного тіла

$$kT''(x) + \frac{\lambda}{d} \int_{-a}^a T'(t) \operatorname{ctg} \left[\frac{\pi(t-x)}{d} \right] dt = q, \quad |x| < a \quad (3)$$

та сингулярного інтегрального рівняння (СІР) з ядром Гільберта відносно похідної висоти зазору $h'(x)$

$$\frac{1}{d} \int_{-a}^a h'(t) \operatorname{ctg} \left[\frac{\pi(t-x)}{d} \right] dt = R(x) + \delta [T(x) - T_{av}] + 2Kp, \quad |x| < a. \quad (4)$$

Тут

$$\begin{aligned} R(x) &= -\frac{1}{d} \int_{-b}^b r'(t) \operatorname{ctg} \left[\frac{\pi}{d}(t-x) \right] dt, \quad T_{av} = \frac{1}{d} \int_{-a}^a T(t) dt, \\ K &= (1 - \nu^2) / E, \quad \delta = \alpha(1 + \nu). \end{aligned}$$

Шляхом заміни змінних $\xi = tg(\pi x/d)$, $\eta = tg(\pi t/d)$, $\alpha = tg(\pi a/d)$, $\beta = tg(\pi b/d)$ трансформуємо СІДР (3) та СІР (4) до такого вигляду:

$$\varphi(\xi)T''(\xi) + 2\xi T'(\xi) + \frac{\lambda d}{k\pi^2} \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{T'(\eta)}{\eta - \xi} d\eta = \frac{d^2}{k\pi^2} \frac{q}{\varphi(\xi)}, \quad |\xi| < \alpha; \quad (5)$$

$$\frac{1}{d} \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{h'(\eta)}{\eta - \xi} d\eta = R(\xi) + \delta \frac{T(\xi) - T_{av}^{\%}}{\varphi(\xi)} + \frac{2Kp}{\varphi(\xi)}, \quad |\xi| < \alpha, \quad (6)$$

де

$$R(\xi) = -\frac{1}{d} \int_{-\beta}^{\beta} \frac{r'(\eta)}{\eta - \xi} d\eta, \quad T_{av}^{\%} = \frac{1}{\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{T(\eta)}{1 + \eta^2} d\eta, \quad \varphi(\xi) = 1 + \xi^2.$$

Розв'язок СІДР (5) отримано числово методом колокацій [4]. СІР (6) розв'язано аналітично, а ширину зазору α знайдено з умови плавного змикання берегів зазору на його кінцях ($h'(\pm\alpha) = 0$).

Для ілюстрації результатів введемо наступні безрозмірні величини: поверхневу теплопровідність $\bar{k} = k / (\lambda d)$, густину теплового потоку $\bar{q} = d\delta q$, інтенсивність тиску $\bar{p} = Kp$, максимальну висоту виїмок $\bar{r}_0 = r_0 / d$, півширину виїмок $\bar{b} = b / d$, температуру межі пружного тіла $\bar{T} = \alpha(1 + \nu)T$, висоту зазорів $\bar{h} = h / d$, координату $\bar{x} = x / d$. Числові розрахунки наведено для $\bar{p} = 0.02$, $\bar{q} = 0.1$, $\bar{k} = 0.001, 0.01, 0.1, 1.0$, $\bar{r}_0 = 0.01$, $\bar{b} = 0.4$.

На рис. 2 зображено розподіл температури \bar{T} на межі пружного тіла S_1 уздовж зазору для різних значень поверхневої теплопровідності \bar{k} . Графіки демонструють чітку закономірність: що вища поверхнева теплопровідність, то меншим є температурне збурення. Мінімальне значення температури \bar{T} досягається в центрі зазору та змінюється нелінійно зі зміною \bar{k} .

Вплив поверхневої теплопровідності \bar{k} на форму зазору проілюстровано на рис. 3. Пунктирна крива відповідає розв'язку задачі за відсутності теплового потоку ($\bar{q} = 0$). Зазор має найбільшу висоту \bar{h} і ширину $2\bar{b}$ за найнижчої провідності ($\bar{k} = 0.001$). Зі збільшенням \bar{k} розміри зазору зменшуються, наближаючись до граничного випадку нульового теплового потоку. Це свідчить про те, що за високої поверхневої теплопровідності вплив теплового потоку на ширину зазору стає неістотним.

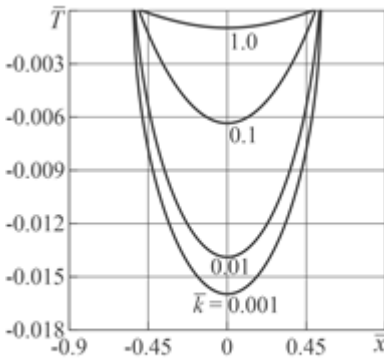


Рис. 2. Розподіл температури

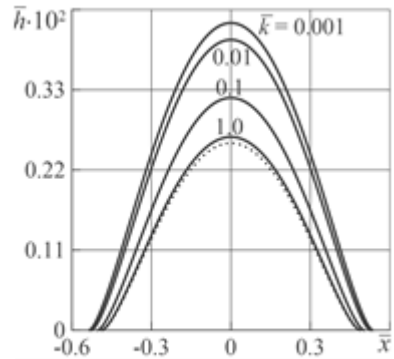


Рис. 3. Форма зазору

- [1]. Benveniste Y. On the decay of end effects in conduction phenomena: A sandwich strip with imperfect interfaces of low or high conductivity. J. Appl. Phys. 1999. 86, № 3. P. 1273–1279.
- [2]. Javili A., Kaessmair S., Steinmann P. General imperfect interfaces. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2014. 275. P. 76–97
- [3]. Martynyak R., Chumak K. Effect of heat-conductive filler on interface gap on thermoelastic contact of solids. Int J Heat Mass Transf. 2012. 55, № 4. P. 1170–1178.
- [4]. Chakrabarti A., Hamsapriye. Numerical solution of a singular integro-differential equation. ZAMM. 1999. 79, № 4. P. 233–241.

CONTACT BETWEEN ELASTIC BODY AND RIGID MICROTEXTURED BASE IN CASE OF HIGH-CONDUCTING INTERFACE

The thermoelastic contact between an elastic body and a rigid base in the presence of a periodic set of thermally insulated interfacial gaps is investigated. The surface of the elastic half-space has high thermal conductivity. The formulated contact problem is reduced to a singular integro-differential equation for the surface temperature, which is solved numerically, and a singular integral equation for the gap height, which is solved analytically. The effect of the surface conductivity on the temperature distribution, heat flows, normal contact stresses, and the transformation of the gap is analyzed.

УДК 624.04

ПРОЕКТУВАННЯ АРОК МІНІМАЛЬНОЇ ВАГИ ПО МЕТОДУ ГРАНИЧНОЇ РІВНОВАГИ

**Чучмай С.М., к.т.н., доц., Твардовський І.О., к.т.н., доц.,
Чучмай О.М., к.т.н., доц.**

Одеська державна академія архітектури та будівництва, м. Одеса

Необхідність розробки питань оптимального проектування конструкцій по граничному стану рівноваги обумовлена запитами інженерної практики, ставить задачу створення ефективних, економічних та легких споруд. Застосування методу граничної рівноваги в сукупності з вимогами оптимізації являється одним із шляхів рішення цієї задачі, оскільки за рахунок досягнутого при цьому раціонального розподілення матеріалів і виявлення міцності резервів конструкцій, пов'язаних з пластичними деформаціями, можливе найбільш повне використання несучої здатності матеріалу. В залежності від підходу оптимальний результат може бути отримано як шляхом пошуку доцільності розташування навантажень, тобто в формі повірочного розрахунку [1], так і визначенням необхідних розмірів конструкції (проектувальний розрахунок) [2,3].

Рішення задачі оптимального проектування по методу граничної рівноваги арок симетричного відносно площини арки поперечного перетину, несучих статичне навантаження в своїй площині. Розрахунок ведеться по недеформованій схемі з урахуванням повного комплексу внутрішніх силових факторі (згинаючий момент M , повздовжніх N та поперечних Q сил). Вихідними даними являються проліт арки l та різниця відміток опор ΔH , положення та величини навантаження, тип поперечного перетину (двотавр, коло, і т.д.), форма осі, що задається рівнянням з точністю до варійованого параметру μ , від величини якого залежить габаритний розмір арки (стріла підйому):

$$\rho = \Phi(\varphi, \mu) \quad (1)$$

де, ρ та φ – поточні координати плоскої кривої.

Визначенню підлягають значення μ та розміри поперечного перетину, які задовільняють умови міцності та прийнятому критерію оптимальності (мінімуму ваги конструкції).

Вважаючи, що матеріал арки однорідний та ідеально пластичний. При однорідному матеріалі найменша вага арки відповідає мінімальному об'єму, тому в подальшому розглядаємо об'єм арки

$$V = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} F_c [a_r(\varphi)] A(\varphi, \mu) d\varphi \quad (r = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

де, $a_r(\varphi)$ – розміри довільного поперечного перетину з координатою φ , визначаючою її компоновку;

$F_c [a_r(\varphi)]$ – площа перетину;

$A(\varphi, \mu)$ – функція, що залежить від вибору системи координат (для

$$\text{полярних координат } A(\varphi, \mu) = \sqrt{[\Phi(\varphi, \mu)]^2 + \left[\frac{\partial \Phi(\varphi, \mu)}{\partial \varphi}\right]^2} \text{).}$$

Величини $a_r(\varphi)$, що входять в співвідношення (2) повинні задовільнити умовам міцності, роль яких в методі граничної рівноваги виконує вираз:

$$f[a_r(\varphi), M, N, Q, \sigma_T] \leq 0 \quad (3)$$

що являє собою в граничному стані умову пластичності. Величини M, Q, N , що містяться в (3), залежать від положення перетину та від параметрів v_j ($j = 1, 2, \dots, k$) де, k – степінь статичної невизначеності системи), характеризуючи рівноважне розподілення внутрішніх зусиль (статично можливе поле):

$$M = M(\varphi, \mu, v_j), \quad N = N(\varphi, \mu, v_j), \quad Q = Q(\varphi, \mu, v_j) \quad (4)$$

отже вираз (3) може бути записаний у наступному вигляді:

$$\psi(\varphi, \mu, v_j, a_r, \sigma_T) \leq 0 \quad (5)$$

Якщо співвідношення (5) виконується в виді суворої рівності для всіх перетинів, то конструкція являється рівно міцною в граничному стані, несуча здатність матеріалу використовується повністю та визначені по (5) розміри перетинів являються мінімально можливими по міцності.

Крім умови міцності (5), на розміри $a_r(\varphi)$ можуть бути накладені додаткові обмеження, наприклад, конструктивного характеру:

$$\bar{f}_i(\varphi, a_r) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, u) \quad (6)$$

В математичному відношенні проектування арок мінімальної ваги в викладеній постановці представляє собою варіаційну задачу пошуку функції $a_r(\varphi)$ та параметрів μ та v_j , мінімізуючи функціонал (2) при обмеженнях (5) (із суворою рівністю) та (6). Якщо рівняння (5) та (6) не дозволяють встановити зв'язок між визначеними величинами в явному вигляді, то використовується мето невизначених множників.

Враховуючи, що підінтегральна функція $F(\varphi, \mu, a_r) = F_c[a_r(\varphi)]$ $A(\varphi, \mu)$ не залежить від похідних функції a_r , і відповідно, рівняння Ейлера спрощується, отримуємо наступну систему рівнянь, рішення якої дає оптимальні значення характеристик, що знаходяться:

$$\begin{cases} \frac{\partial F^*}{\partial a_r} = 0 \\ \frac{\partial V^*}{\partial \mu} = 0 \\ \frac{\partial V^*}{\partial v_j} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

де,

$$F^* = F(\varphi, \mu, a_r) + \lambda_0 \psi(\varphi, \mu, v_j, a_r, \sigma_T) + \sum_{i=1}^u \lambda_i \bar{f}_i(a_r);$$

$$V^* = V + \lambda_0 \psi(\varphi, \mu, v_j, a_r, \sigma_T) + \sum_{i=1}^u \lambda_i \bar{f}_i(a_r);$$

λ_0 та λ_i – множник Лагранжа.

В результаті розрахунку отримаємо арку змінного перерізу. При цьому наведене рішення може бути розповсюджено на випадок постійного перерізу.

- [1]. Верба Р.В., Чирас А.А. Поверочная задача расчета арок по состоянию предельного равновесия. «Liet. mech. rinkinus, Лит. мех. сб. «Минтис». Вильнус, 1969 №2.
- [2]. Верба Р.В., Чирас А.А. Оптимальное проектирование арок по предельному равновесию. «Liet. mech. Rinkinus, Лит. мех. сб. «Минтис». Вильнус, 1970 №1.
- [3]. Эстрин М.И. К теории оптимального проектирования жестко-пластических плит. Новые методы расчета строительных конструкций, вып. 2, сборник статей ЦНИИСК им. Кучеренко, Стройиздат, М., 1971.
- [4]. Баженов В. А. Будівельна механіка. Комп'ютерні технології ; за заг. ред. д-ра техн. наук проф. В. А. Баженова / В. А. Баженов, А. В. Перельмутер, О. В. Шишов. Київ: Каравела, 2009. 696 с.
- [5]. Шутенко Л. М. Механіка споруд / Л. М. Шутенко, В. П. Пустовойтов, М. А. Засядько, Харків: ХДАМГ, 2001. 234 с.

DESIGN OF MINIMUM-WEIGHT ARCHES USING THE LIMIT EQUILIBRIUM METHOD

The need to develop methods for the optimal design of structures based on the limit state of equilibrium stems from the demands of engineering practice, which calls for the creation of efficient, economical and lightweight structures. In connection with this, there has arisen a need to solve the problem of optimal design using the limit equilibrium method for arches symmetrical about the plane of the arch cross-section, which carry a static load in their plane. The calculation is carried out using an undeformed model, taking into account the full range of internal forces (bending moment M , longitudinal forces N and transverse forces Q).

УДК 624.04

РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ ПРИ ВИГІНІ З КРУЧЕННЯМ

Чучмай С.М., к.т.н. , доц., Чучмай О.М., к.т.н. , доц.
Одеська державна академія архітектури та будівництва, м. Одеса

Проблема зменшення власної ваги залізобетонних конструкцій стоїть перед будівельникам. Вирішується ця проблема застосуванням міцних матеріалів, легких заповнювачів, просторових конструкцій, а також розробкою та уточненням методів розрахунку, що підтверджуються експериментальними даними.

До розробки та уточнення методів розрахунку відносяться завдання експериментальних та теоретичних досліджень залізобетонних елементів, що працюють на складні деформації: косий позацентричний стиск, косий вигин, косий вигин із крученням. Такі елементи часто зустрічаються в практиці проектування та будівництва і тому дослідженням їхньої роботи приділялося і приділяється велика увага.

Однак способи розрахунку які використовуються в даний час цих елементів дуже роз'єднані, слабо підкріплені експериментами і недостатньо відображають дійсний напружений стан елементів [1].

В залізобетонних конструкціях крутіння у чистому вигляді майже не зустрічається, зате у поєднанні з вигином – дуже часто. У порівнянні з вигином опір залізобетонних елементів кручення істотно нижче. Тому в ряді конструкцій, незважаючи на відносно невеликі по абсолютному значенню крутних моментів, вплив їх необхідно враховувати.

Прикладами залізобетонних елементів, що випробовують вигин спільно з крученням, служать: щогла, що знаходиться під впливом поперечних зовнішніх сил, прикладених на відстані від осі елемента, балка з односторонньою завантаженою плитою та ін.

Досліди показали, що при крученні залізобетонний елемент в початковій стадії завантаження, до утворення тріщин, працює пружно. У ньому виникають головні стискаючі і головні розтягуючі напруги, спрямовані під кутом 45° до поздовжньої осі. Поява тріщин та його нахил залежить від величини і напрямки основних розтягуючих напруг. Характерним є розташування тріщин по гвинтовим лініям. Внаслідок невисокого опору бетону розтягуванню тріщини в бетоні елементів, що скручуються, з'являються на ранніх стадіях завантаження. Після утворення тріщин зусилля у напрямку головних розтягуючих напруг, сприймає арматура, а зусилля в напрямку головних стискаючих напруг — бетон. Руйнування елемента

настає, коли в розтягнутій арматурі з'являються значні пластичні подовження, а стискаючі напруги в периферійних частинах поперечного перерізу елемента досягають межі міцності бетону.

Вигин, що супроводжується крученням, представляє в залізобетоні явище дуже складне. Елементи прямокутного профілю, що працюють на вигин з крученням, експериментально вивчали А. А. Гвоздев, Н. Н. Лессіг, Ю. В. Чиненков та ін [2].

З експериментів, несуча здатність елемента визначається методом граничного рівноваги з урахуванням утворення просторової тріщини. Руйнування елемента відбувається за просторовим перерізом; три його грані розтягнуті, а четверта стиснута. Передбачається, що на момент руйнування напруги в арматурі досягають межі плинності, а бетони стиснутої зони призмної міцності. Результати досліджень показали, що залежно від співвідношення значень згинального M_z і крутного $M_{кр}$ моментів, а також наявності поперечної сили Q можуть бути різні схеми руйнування, що відрізняються положенням стиснутої зони [3]:

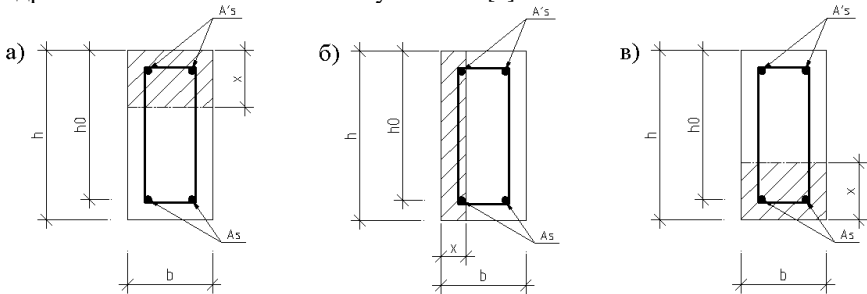


Рис.1. Зони руйнування в елементах прямокутного перерізу при різних видах поєднання крутних, згинальних моментів та поперечних сил

1. За наявності згинального та крутного моментів руйнування елемента відповідає схемі, наведеній на рис. 1, а. Тріщина у розгортці утворює пряму лінію. Умова міцності перерізу записується із співвідношення моментів зовнішніх та внутрішніх сил відносно осі, що проходить через центр тяжкості стиснутої зони.

2. Характерна схема руйнування у разі дії моменту, що крутить, і поперечної сили, при відсутності або при незначному згинальному моменті, представлена на рис. 1, б. На одній із бічних граней елемента внаслідок плинності арматури хомутів розкриваються похилі тріщини.

В умовах міцності перерізу при визначенні моменту внутрішніх зусиль щодо осі, що проходить через центр тяжкості стисненої зони, крім арматури враховується робота розтягнутих гілок хомутів.

3. Третій варіант руйнування можливий при малому в порівнянні з крутним згинальним моментом і коли верхня арматура, яка потрапляє в розтягнуту зону, значно слабша за нижню (рис. 1, в). У цьому випадку руйнація починається із верхньої зони.

4.

[1]. Расчет железобетонных конструкций при сложных деформациях./ Под ред. М.С. Трояника. М., Стройиздат, 1974. 297 с.

[2]. Железобетонные конструкции. Общий курс./ Мурашев В.И., Сигалов Э.И., Байков В.Н., Госстройиздат, 1962. 659 с.

[3]. Железобетонные конструкции / Под ред. Полякова Л.П., Лысенко Е.Ф. и Кузнецова Л.В. К.: Вища школа. Головное издательство, 1984. 352 с.

[4]. ДБН В.2.6-98:2009 "Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення" зі зміною №1.

FAILURE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS OF RECTANGULAR SECTION DURING BENDING WITH TORSION

In reinforced concrete structures, torsion in its pure form is almost not found, but in combination with bending - very often. Compared to bending, the resistance of reinforced concrete elements to torsion is significantly lower. Therefore, in a number of structures, despite the relatively small absolute value of torques, their influence must be taken into account. The work considers possible variants of the destruction of reinforced concrete elements depending on the ratio of bending, torques and transverse forces acting in the beam.

УДК 621.787

THEORETICAL JUSTIFICATION OF METALLIC SURFACE HARDENING BY PLASTIC SHOT BLASTING

**Shapoval O. O., Dr. of Tech. Sc., Prof., Kulynych V. D., PhD,
Kulynych S. A., PhD student**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk
Savchenko Iu., PhD, Assos. Prof.

University of Customs and Finance, Volodymyr Vernadsky Str., Dnipro

Enhancing the service life and reliability of metallic components operating under cyclic loading, wear, and aggressive environments remains a critical challenge in modern mechanical engineering. Surface engineering methods aimed at inducing compressive residual stresses are among the most effective approaches

for improving fatigue resistance and structural integrity without altering the bulk properties of materials. Such methods are widely applied in aerospace, automotive, and power engineering industries, particularly for components subjected to high dynamic loads and strict dimensional requirements.

Conventional shot peening techniques, which employ metallic or ceramic media, are broadly used to improve surface properties. However, these methods may lead to increased surface roughness and the formation of subsurface defects, which limits their applicability for thin-walled, precision, and geometrically sensitive components. In this context, plastic shot blasting represents a promising alternative due to its reduced aggressiveness and ability to provide controlled plastic deformation of the surface layer. This approach is particularly relevant for lightweight structures, precision mechanical systems, and components requiring high surface integrity.

Surface strengthening by impact-based treatments has been extensively investigated, with conventional shot peening (SP), ultrasonic impact peening (UIP), and laser shock peening (LSP) recognized as the most established techniques for inducing compressive residual stresses and improving fatigue performance [1]. Numerous studies have demonstrated that these methods enhance wear resistance, corrosion behavior, and structural durability through grain refinement and strain hardening mechanisms [2], [3].

Recent developments, including severe shot peening (SSP) and gradient peening approaches, focus on optimizing process parameters such as impact intensity, coverage, and shot size to achieve a balance between strengthening efficiency and surface integrity [4]. In parallel, numerical modeling and simulation techniques are widely used to predict stress distribution and optimize technological parameters of the process [4], [5].

However, the vast majority of existing studies are devoted to rigid media (metallic or ceramic shot), while the use of plastic particles remains relatively underexplored. Available research is mainly focused on experimental observations and specific technological solutions [3], [6], whereas the theoretical description of wave processes, deformation mechanisms, and stress formation in the surface layer is insufficiently developed.

This gap highlights the necessity of developing a comprehensive theoretical framework describing the interaction between plastic shot and metallic surfaces under high-velocity impact conditions, which is essential for further optimization and industrial implementation of non-abrasive surface hardening methods. The experimental studies have been carried out to evaluate the impact of plastic particle on a metallic surface. When a spheroidal plastic particle strikes a metallic surface, in the initial phase, the determining factors are not fluid flow phenomena, but rather the compressibility of the material, which leads to a sharp increase in pressure.

The maximum dynamic pressure in this case is given by the equation:

$$P = \rho_0 c V_0 \quad (1)$$

ρ_0 - initial density of the plastic medium; c - initial speed of sound in the plastic material; V_0 - impact velocity.

In the case of relatively low-speed impacts, the shock wave propagation velocity c can approximately be replaced by the speed of sound in an undeformed medium, c_0 . However, at sufficiently high values, this simplification becomes inaccurate, and the shock wave's speed must be determined by accounting for pressure changes and variations in particle velocity within the medium.

Assuming the surface of the solid body is rigid, the deceleration speed of the particle equals the impact velocity V_0 . The relationship between the pressure jump at the wavefront, P , and the wave propagation speed becomes more complex and involves the medium's thermodynamic properties at high pressures.

At very high pressures, the medium's compressibility must be considered due to decreasing intermolecular distances. The expression for the wave velocity c can be written as:

$$c = c_0 + \lambda V \quad (2)$$

Combining equations (1) and (2), we obtain:

$$P = \rho_0 c_0 V \left(1 + \lambda \frac{V}{c_0} \right) \quad (3)$$

Where λ is a material constant; for synthetic materials, λ typically ranges from 1.4 to 1.8.

In equations (2, 3), the value V represents the particle velocity at the shock front and corresponds to the impact velocity only in the case where the solid can be considered rigid. As noted earlier, the initial stage of spherical particle penetration into a metal is elastic.

The behavior of the elastic target can be approximately described by assuming that a flat stress wave arises in the solid, related to the shock of velocity V_2 , defined via:

$$P = \rho_2 c_2 V_2 \quad (4)$$

where ρ_2 and c_2 - density and sound speed in the target material; V_2 - particle velocity in the target (metallic surface).

The jump in particle velocity in the plastic particle is determined by $V_1 = V_0 - V_2$.

And is related to the shock pressure by the expression:

$$P = \rho c (V_0 - V_2) \quad (5)$$

Assuming that the shock wave velocity c is determined by a constant sound speed c_0 , substituting V_2 into equation (5) yields the well-known expression:

$$P = \frac{\rho_0 c_0 V_0}{1 + \frac{\rho_0 c_0}{\rho_2 c_2}} \quad (6)$$

The duration of elevated pressure depends on the size and velocity of the impacting mass, as well as the shock wave propagation speed in the striker material. The high-pressure regime persists until a rarefaction wave reaches the free surface.

Fig. 1 shows the conditions during the impact of a particle against a solid surface. The velocity of the particle at the moment of impact is assumed to be perpendicular to the surface of the body.

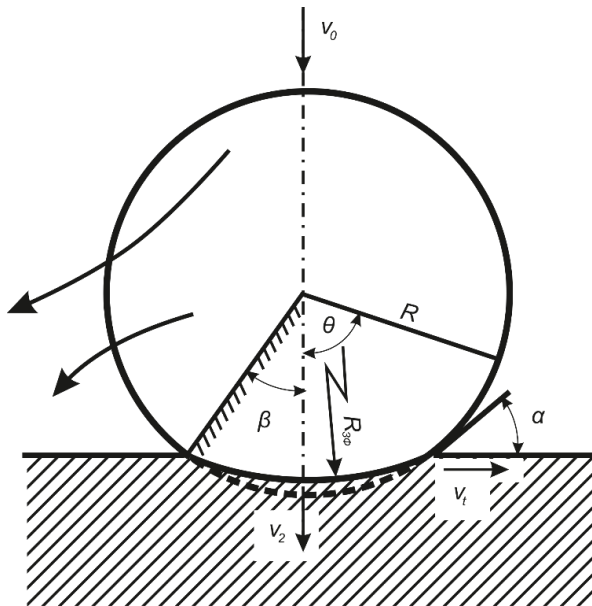


Fig. 1. Schematic representation of plastic shot penetration into metal.

Comparison of the values of ξ_0 calculated for various materials and velocities (Table 1) with the initial values of ξ , at which the quasi-stationary regime begins, shows that they are close in magnitude.

Therefore, when calculating the stress-strain state in the deformation zone during the impact of a plastic particle, it is necessary to substitute R into the corresponding expressions, and to begin the calculation from the penetration stage corresponding to ξ_0 .

Table 1

Dependence of ξ_0 from M_0 during impact of a plastic particle on a metallic surface (numerator - aluminum alloy, denominator - steel)

Particle Material		M_0				
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Fluoroplastic	ξ_0	0,080	0,102	0,122	0,141	0,157
		0,036	0,048	0,058	0,069	0,078
Polyethylene		0,064	0,083	0,100	0,116	0,130
		0,028	0,037	0,045	0,053	0,061
Polystyrene		0,059	0,076	0,092	0,107	0,121
		0,026	0,033	0,041	0,048	0,056
Polyvinyl chloride		0,050	0,065	0,079	0,092	0,105
		0,021	0,028	0,034	0,041	0,046

After time τ , which is characteristic of the wave process, quasi-stationary expansion of the particle begins. It is assumed that the substance of the particle behaves like a viscous incompressible fluid under conditions of high compression. In this case, the viscous stresses $\mu_0 = \frac{\partial v_2}{\partial z}$ exceed the yield strength of the particle material.

For a quasi-static analysis, it is necessary that the braking time of the particle be greater than the characteristic wave time.

A similar problem was solved in [5] based on the model of a viscous incompressible fluid and an elastic medium under unidirectional impact pressure (Fig. 1), corresponding to acceleration or penetration conditions.

Assuming that the external force is distributed over the surface of the particle according to the law $P(r_0, \theta) = \rho_0 V_0^2 f(\theta)$, where $f(\theta) = \begin{cases} \cos^2 \theta & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi \end{cases}$ and neglecting surface friction, we find the pressure and velocity fields, define the characteristic expansion angles, the size of the non-destroyed compact zones, and provide estimates of the impact impulse leading to complete particle breakup. Omitting derivations, we present some final results and conclusions.

In most regions of the particle, material flows outward. However, on the side of applied pressure within the particle, there is a compact head zone with inward material motion. This region is located in the front sector with a central angle β (see Fig. 1).

During the destruction process, the compact zone is preserved. The rest of the substance slides along the generators of this cone, flying outward in accordance with the theory of viscous spreading and the theory of elasticity.

The particle completely disintegrates when the radial displacements

$$\Delta_R = \int_0^t V_r dt$$

when $\theta=0$, the expression for determining these total displacements is:

$$\Delta = \frac{(|\Delta_R(R_0,0)| + |\Delta_R(R_0,\pi)|)}{R_0} = 0,18J\mu_0 \quad (7)$$

For $\Delta=2$, which corresponds to complete disintegration of the particle, the critical value of specific impulse is $J_c = 12\mu_0$.

Elastic particles, for example, metallic ones or made of brittle plastics are destroyed at radial deformation $\Delta \approx 1$, which corresponds to $J_c \approx 6\mu_0$.

For brittle materials, it is also characteristic that the compact zone is located in the sector $2\theta = 90^\circ$, where maximum tangential stresses are observed, and the zone at $\theta = \frac{\pi}{2}$ contains tensile stresses, which are the determining factor in the destruction of brittle particles.

In the vicinity of the critical point $\theta = 0$, pure compressive stress occurs. This region is the most "resistant". The maximum particle velocity, if the condition $P_0 > \sigma_S$ leads to viscous flow, is determined by the expression:

$$V_c = \frac{JJ_c}{8\rho R_0} = \frac{\mu_0}{\rho_0^{2/3}} \left(\frac{4\pi}{3M_0} \right)^{1/3} \psi, \text{ where } \psi = 2,5 \div 5. \quad (8)$$

From this, it follows that the critical velocity at which destruction occurs upon collision with a solid surface is determined by the degree of deformation Δ , and is inversely proportional to the radius and density and directly proportional to the viscosity of the particle material.

When plastic shot impacts a hard metallic surface, two loading stages are observed. The first stage, characterized by elevated pressure, ends practically at the point of elastic penetration. During the second stage, plastic deformation mainly occurs, and the pressure $P = \rho_0 V_0^2$ is realized, from which the required velocity can be determined:

$$V_0 = \sqrt{\frac{P}{\rho_0}}, \quad (9)$$

where P is the deformation pressure of the surface.

Analysis of equations shows that, in order to achieve moderate work hardening of aerospace materials, impact velocities in the range of hundreds to thousands of meters per second are required. Achieving such velocities using existing equipment with pneumatic, centrifugal, or similar drives is not

feasible. The only suitable option is the use of impulse-based launching methods, which are characterized by the instantaneous release of energy.

Under unidirectional loading of the particle during acceleration, conditions similar to those considered earlier for penetration are realized. When the applied specific impulse exceeds the critical value, fragmentation also occurs. Therefore, in this case, expression (9) is valid for determining the critical velocity. Thus, during the acceleration of a single particle, the maximum achievable velocity under sudden load application is limited by the critical velocity. When launching multiple particles, collisions between them occur during the initial acceleration phase, resulting in crumpling, loss of shape, and destruction.

To eliminate these undesirable effects, the gaps between the particles must be filled with a fluid whose acoustic impedance is close to the acoustic impedance of the particle material.

When a pressure wave passes through such a two-phase medium, reflection at the interfaces is minimal and, accordingly, there is no particle disintegration. The most promising energy sources are explosives and electric discharge.

The conducted studies confirm the effectiveness of plastic shot peening using high-speed polymer spheres as a promising method for inducing residual compressive stresses in surface layers of metallic components. This technique ensures the absence of subsurface tensile stress peaks, which is a significant advantage over conventional methods. The results also demonstrate the clear dependence of residual stress levels on the number of impacts and the characteristics of the shot material.

Additionally, thermal post-processing significantly reduces residual stresses, which must be taken into account when using this method in combination with sensor installation or other temperature-sensitive applications. Therefore, to maintain the induced stress state, it is critical to avoid heat exposure above 100–120°C unless controlled stress relaxation is intended.

The use of compact pulse-powered systems for shot acceleration makes the method mobile, scalable, and potentially suitable for application in constrained environments, such as internal surfaces and hard-to-reach areas of complex parts. This opens up broad opportunities for integration into manufacturing and maintenance processes, particularly in aerospace, automotive, and precision instrumentation industries.

However, to fully validate the reliability and applicability of this method, further experimental verification is required under a wider range of material types, geometries, and service conditions. Large-scale field testing in real-world operational environments is essential to establish performance durability, long-term effects, and to optimise process parameters for industrial use.

[1] John M, Kalvala PR, Misra M, Menezes PL. Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications. Materials (Basel). 2021 Jul 9;14(14):3841. doi: 10.3390/ma14143841. PMID: 34300760; PMCID: PMC8307355.

[2] Huang, Hao & Niu, Jintao & Xing, Xiangtao & Lin, Qichao & Chen, Hongtang & Qiao, Yang. (2022). Effects of the Shot Peening Process on Corrosion Resistance of Aluminum Alloy: A Review. Coatings. 12. 629. 10.3390/coatings12050629.

[3] Drahobetsky, V.V., Shapoval, A.A., Shchetynin, V.T., Argat, R.G., Shlyk, S.V., Mos'pan, D.V., Gorbatyuk, S.M., Markov, O.E. New Solution for Plastic Deformation Process Intensification (2022) Metallurgist, 65 (9-10), pp. 1108-1116. DOI: 10.1007/s11015-022-01253-x.

[4] Chen JS, Desai DA, Heyns SP, Pietra F. Literature review of numerical simulation and optimisation of the shot peening process. Advances in Mechanical Engineering. 2019;11(3). doi:10.1177/1687814018818277

[5] Khrebtova, O., Shapoval, O., Markov, O., Kukhar, V., Hrudkina, N., & Rudych, M. (2022). Control systems for the temperature field during drawing, taking into account the dynamic modes of the technological installation. In Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005724>

[6] Aikin, M., Shalomeev, V., Kukhar, V., Kostryzhev, A., Kuziev, I., Kulynych, V., Dykha, O., Dytyniuk, V., Shapoval, O., Zagorskis, A., et al. (2025). Recent advances in biodegradable magnesium alloys for medical implants: Evolution, innovations, and clinical translation. Crystals, 15, 671. <https://doi.org/10.3390/cryst15080671>

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ МЕТАЛІВ ПЛАСТИЧНИМ ДРОБОСТРУМИНИМ ОБРОБЛЕННЯМ

У роботі наведено теоретичне обґрунтування застосування пластичного дробоструминного оброблення як методу зміцнення поверхні металевих матеріалів. Процес базується на багаторазовій ударній дії пластичних частинок, що викликає локалізовану пластичну деформацію та формування стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі. На відміну від традиційних методів із використанням металевого або керамічного дробу, застосування пластичних середовищ забезпечує більш м'який характер взаємодії, зменшує шорсткість поверхні та запобігає утворенню підповерхневих мікротріщин, що є важливим для тонкостінних і геометрично чутливих виробів. Наукова новизна полягає у розробленні теоретичної моделі взаємодії пластичного дробу з металевою поверхнею на основі положень контактної механіки та теорії деформації матеріалів. Встановлено закономірності розподілу напружень і деформацій із урахуванням ролі дислокаційної структури у формуванні зміцненого шару. Визначено ключові параметри процесу, зокрема швидкість і розмір частинок, твердість матеріалу та тривалість оброблення. Показано, що запропонований підхід є ефективним засобом підвищення втомної міцності без порушення геометричної точності деталей та має перспективи промислового застосування.

УДК 621.791.76.044.2

МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТРУБИ ТА ТРУБНОЇ РЕШІТКИ

**Шаповал О.О., д.т.н., проф., Вакуленко Р.А., к.т.н., доц.,
Кузєв І.О., ст. викл.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, м. Кременчук

Кухар В.В., д.т.н., проф.

Технічний університет Метінвест ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя

З'єднання труб із трубними решітками в теплообмінних апаратах є одним із відповідальних вузлів, який впливає на довговічність та надійність експлуатації енергетичного та хімічного обладнання. Підвищення надійності основного елемента теплообмінного апарата – трубних решіток із закріпленими трубами є актуальною проблемою у галузях машинобудування, що освоюють виробництво теплообмінних апаратів. Важливість даних з'єднань для роботи обладнання обумовлена як їх кількістю від 10^2 до 10^4 з'єднань в одному теплообміннику, так і несприятливою комбінацією теплових та механічних навантажень впливом у корозійних середовищах. Дані обставини висувають високі вимоги не тільки до вибору матеріалів, але й до технологій виготовлення з'єднань для досягнення тривалого терміну служби всього агрегату.

Актуальним питанням є розробка моделі динамічної взаємодії труби з трубними решітками, використання якої дозволить визначити основні параметри процесу кріплення труб для нового способу з'єднання труб із трубними решітками.

Запропоновано модель плоского напруженого стану системи труба – труба решітка, в якій всі процеси взаємодії, зумовлені рівномірним по поверхні труби імпульсним навантаженням, розглянуті в площині (x, y) , перпендикулярній осі труби (рис. 1):

$$P(t) = P_T e^{-t/\theta}, \quad (1)$$

де P_T – максимальний тиск на фронті ударної хвилі, Па; t – час, що відрховується від моменту приходу фронту ударної хвилі в дану точку середовища, с; θ – характеристичний час спаду тиску в ударній хвилі, с.

Динамічна поведінка деталей, що з'єднуються, описується системою рівнянь: руху, нерозривності, енергетичного балансу, зв'язку напружень і деформацій за відповідних початкових і граничних умов.

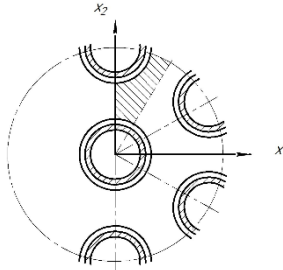


Рис. 1. Модель плоского напруженого стану системи – труба решітка

Рівняння руху визначають закономірності руху точок системи залежно від внутрішніх сил – напруг:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Sigma_{xx}^i}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}^i}{\partial y} + \frac{T_{xy}^i}{y} &= \rho^i \ddot{x}^i; \\ \frac{\partial T_{xy}^i}{\partial x} + \frac{\partial \Sigma_{yy}^i}{\partial y} + \frac{\Sigma_{yy}^i - \Sigma_{\theta\theta}^i}{y} &= \rho^i \ddot{y}^i; \end{aligned} \right| \quad (2)$$

$$\Sigma_{xx}^i = s_{xx}^i - (p^i + q^i), \quad \Sigma_{yy}^i = s_{yy}^i - (p^i + q^i), \quad \Sigma_{\theta\theta}^i = s_{\theta\theta}^i - (p^i + q^i),$$

де $i=1,2$ – позначає елемент системи (1 – труба, 2 – дошка); x, y – декартові або циліндричні координати; $\Sigma_{xx}^i, \Sigma_{yy}^i, \Sigma_{\theta\theta}^i, T_{xy}^i$ – повні напруги (радіальна, осьова, широтна і дотична, відповідно), $\left| \right|^*$ – позначає члени, які відсутні в декартовій системі координат, $s_{xx}, s_{yy}, s_{\theta\theta}$ – компоненти діватора напруг, p, q – гідростатичний тиск та штучна в'язкість.

Рівняння нерозривності висловлює умову суцільності тіл у процесі деформування

$$\frac{V^i}{V^i} = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial y} + \frac{\mathcal{E}^*}{y}, \quad (3)$$

де V^i – елементарний об’єм.

Рівняння енергетичного балансу відображає закон збереження механічної енергії при деформуванні тіл у диференціальній формі

$$\mathcal{E} = -(p + q)\mathcal{E} + V(s_{xx}\mathcal{E}_{xx} + s_{yy}\mathcal{E}_{yy} + s_{\theta\theta}\mathcal{E}_{\theta\theta} + T_{xy}\mathcal{E}_{xy}), \quad (4)$$

де \mathcal{E} – механічна потужність внутрішніх сил в елементарному об’ємі;

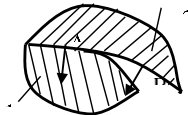
$q\mathcal{E}$ – потужність незворотного розсіювання (дисипації) механічної енергії.

Рівняння стану визначають співвідношення між параметрами деформованого стану.

Умова пластичної течії. Використовується критерій пластичності Мізеса: при досягненні тензором напружень критеріального значення деформування набуває суто пластичного характеру

$$s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 \leq \frac{2}{3}(Y^0)^2, \quad (5)$$

де Y^0 – межа плинності при розтягуванні.



1 – зовнішня поверхня труби; 2 – зовнішня поверхня трубної решітки

Рис. 2 – Контакт труби та трубної решітки

Умови контакту. Контакт труби та трубної решітки (рис. 2) може мати тимчасовий та локальний характер.

Розв’язання системи рівнянь виконується за методом Вілкінса. При дискретизації використовується дивергентна форма похідних, що базується на наступних виразах

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\int F(h_i^x) ds}{A}, \quad \frac{\partial F}{\partial y} = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\int F(h_j^y) ds}{A}, \quad (6)$$

де F – функція координат, що диференціюється; C – межа області; s – довжина дуги, \mathbf{h} – вектор зовнішньої нормалі до межі.

1. Завдяки аналізу процесу незалежного руху труби можна встановити момент, коли виконується умова зіткнення, фіксуючи відповідні значення функцій переміщень та швидкостей переміщення. Визначаються також

значення швидкості спільного руху після зіткнення. Значення всіх цих параметрів використовуються як початкові при вирішенні рівнянь спільного руху.

2. Контактний тиск враховували у рівнянні спільного руху. Труба і трубні решітки здійснюють коливальні рухи з різним періодом і бувають моменти, коли контактний тиск дорівнює нулю. Тому для оцінки натягу усереднювали значення функцій переміщення та контактного тиску в інтервалі часу, значно більшому, ніж періоди коливань деталей, що з'єднуються.

3. Процедура чисельного розв'язання рівнянь руху полягала в послідовному визначенні, починаючи з початкових умов, значення швидкості в черговому вузлі, потім функції переміщення в напівцілому, і так аж до закінчення етапу вільного або роздільного руху. Значення функцій деформації в останньому цілому тимчасовому вузлі t^N використовувалися як початкові умови для вирішення рівнянь руху наступного етапу.

- [1] Surianinov, M., Shyliaiev, O. (2018). Calculation of plate-beam systems by method of boundary elements. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. Vol. 7(2). P. 238–241. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.23.11927 V.
- [2] Fomin, V., Bekirova, M., Surianinov, M., Fomina, I. (2019). Nonlinear dynamic analysis of a reinforced concrete frame by the boundary element method. *Materials Science Forum*, 968 MSF. P. 383- 395.
- [3] Shapoval, A. and Shapoval, A. (2002). Development of the unit for multi -stage vibration drawing of metal products. *Tsvetnye Metally*. Vol. 4. P. 77–82.
- [4] Hrudkina, N.S., Markov, O.E., Shapova, I A.A., Titov, V.A., Aliiev, I.S., Abhari, P., Malii, K.V. (2022). Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion *FME Transactions*. Vol. 50(1). P. 90–98.
- [5] Pavlenko, D.V., Belokon', Y.O., Tkach, D.V. (2020). Resource-Saving technology of manufacturing of semifinished products from intermetallic γ -TiAl alloys intended for aviation engineering. *Materials Science*. Vol. 55(6). P. 908–914.
- [6] Kruzhiiko, O., Volodchenkova, N., Maystrenko, V., Bolibruch, B., Kalinchyk, V.P., Zakora, A., Feshchenko, A. and Yeremenko, S. (2021). Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprise. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 1(108). P. 35–41.
- [7] Sereda, B., Zhrebtsov, A., Belokon', Y. (2010). The modeling and processes research of titan aluminides structurization received by SHS technology. *TMS Annual Meeting*. P. 99–105.
- [8] Sereda, B., Sereda, D., Belokon, Y. (2015). Investigation of corrosion and oxidation of γ -TiAl alloys obtained in self propagating high temperature synthesis. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*. 2015. Vol. 2. P. 1249–1255

MODEL OF DYNAMIC INTERACTION BETWEEN PIPE AND PIPE GRID

The article presents a model of the flat stress state of the pipe - pipe grid system, in which all interaction processes are caused by an impulse load uniform over the surface of the pipe. The dynamic behavior of the connected parts is described by a system of equations – motion, continuity, energy balance, and stress-strain coupling under the appropriate initial and boundary conditions. The equations of state determine the relationship between the deformed state parameters. The spherical and deviatoric parts of the stress and strain tensors are considered. To ensure the plastic flow condition Von Mises plasticity criterion is applied. Artificial viscosity was used to combat the numerical instability of the solution and simulate viscous flows. Boundary, initial, as well as contact conditions are given. The system of equations was solved using the Wilkins model. The stages of deformation are considered, during the free pipe distribution and at the collision moment. The obtained model allows calculating the flaring parameters based on numerical methods. Two types of cells were used for modeling, differing in the number of surrounding holes. Using the division of the pipe fragment in the radial and latitudinal directions, the minimum and maximum grid models were obtained. The tension estimate was performed by averaging the values of the displacement and contact pressure functions over a time interval significantly longer than the oscillation periods when the parts being joined. A procedure for numerical solving the motion equations was carried out, consisted of sequentially determining, starting from the initial conditions, the value of the velocity at the next node, then the displacement function in the half-integer, and so on until the end of the stage of free or separate motion. A computational process for determining the deformation function and rate of the deformation function at time nodes using finite-difference expressions was performed.

УДК 614.841.33:373.2

УТОЧНЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ДІТЕЙ ДОШКІЛЬНОГО ВІКУ ПІД ЧАС ЕВАКУАЦІЇ ПРИ ПОЖЕЖІ

Щолоков Е.Е.

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси

Забезпечення евакуації дітей із будівель закладів дошкільної освіти є одним із питань пожежної безпеки таких об'єктів. Особливість цих будівель полягає в тому, що під час евакуації значна частина осіб потребує організованого супроводу з боку дорослих. Діти раннього та дошкільного віку мають різну швидкість пересування, різний рівень організованості руху, а також різну реакцію на сигнал оповіщення та зміну умов перебування.

У чинних підходах до розрахунку часу евакуації параметри руху дітей дошкільного віку часто застосовуються як узагальнені. Водночас реальна вікова структура груп у закладах дошкільної освіти охоплює дітей раннього, молодшого, середнього та старшого дошкільного віку.

Питання моделювання евакуації людей при пожежі розглядалося в низці наукових праць. У роботі [1] досліджено застосування програмного забезпечення Pathfinder для моделювання евакуації людей у разі пожежі. Такий підхід дає змогу враховувати геометрію будівлі, розміщення людей, параметри їхнього руху та особливості формування людських потоків.

У праці [2] розглянуто евакуацію маломобільних груп населення з житлових висотних будинків при пожежі. У межах цього дослідження показано доцільність врахування фізичних можливостей людей під час визначення тривалості евакуації. Подібний підхід може бути використаний і для дітей дошкільного віку, оскільки їхні параметри руху залежать від віку, рівня самостійності та потреби в супроводі.

Окрім дослідження присвячені системам оповіщення та організації евакуації дітей з особливими освітніми потребами. У роботах [3,4] розглянуто питання удосконалення системи оповіщення та евакуації дітей з порушенням слуху у закладах освіти. У цих працях увагу приділено адаптації евакуаційних заходів до особливостей конкретних груп дітей.

У роботі [5] розглянуто стан безпеки шляхів евакуації. Для евакуації дітей це пов'язано зі станом коридорів, сходів, дверних прорізів, наявністю перешкод, освітленням і зрозумілістю напрямків руху. У дослідженні [6] розглянуто евакуацію дітей при пожежі з ігрових майданчиків із повністю закритим устаткуванням. У роботі враховано особливості руху дітей у просторі зі складною конфігурацією та обмеженими умовами переміщення.

У роботі [7] розглянуто забезпечення безпеки евакуації маломобільних груп населення за допомогою пожежних ліфтів. Для теми евакуації дітей ця праця є дотичною, оскільки також стосується організації переміщення осіб, які мають обмеження щодо швидкого самостійного руху.

Аналіз наведених джерел дозволяє визначити декілька положень. Моделювання евакуації може використовуватися для оцінювання часу виходу людей із будівлі. Параметри руху доцільно приймати з урахуванням характеристик груп людей, які евакуюються. Для дітей дошкільного віку це передбачає деталізацію параметрів руху за віковими групами.

Для оцінювання впливу вікових параметрів руху було розглянуто модель типової двоповерхової будівлі закладу дошкільної освіти. У моделі враховано шляхи евакуації, евакуаційні виходи, рух внутрішніми сходами та зовнішніми відкритими сходами типу СЗ. Час початку руху людських потоків прийнято з урахуванням роботи системи оповіщення.

Моделювання виконано за двома сценаріями. У першому використано узагальнені нормативні значення для дітей дошкільного віку, у другому – для дітей 2–3 років прийнято уточнені параметри, отримані за результатами натурних досліджень, тоді як для старшої вікової групи їх залишено без змін.

Розрахунки показали, що врахування вікових особливостей впливає на тривалість евакуації. Після початку руху її час збільшився з 81 с до 110 с, тобто на 35,8 %, а загальний показник – з 441 с до 470 с. Це свідчить, що застосування однакових нормативних значень для всіх дітей дошкільного віку може занижувати розрахунковий результат.

Таким чином, під час оцінювання евакуації із закладів дошкільної освіти доцільно враховувати не лише загальні нормативні параметри руху дітей дошкільного віку, а й відмінності між окремими віковими групами. Уточнення полягає в тому, що для дітей 2–3 років приймаються окремі параметри руху, відмінні від параметрів дітей 4–6 років, з урахуванням нижчої швидкості пересування, більшої залежності від супроводу дорослих та особливостей організації групового руху. На відміну від підходу, де всі діти дошкільного віку розглядаються як одна категорія, запропонований підхід передбачає диференціацію розрахункових значень за віком і типом шляхів евакуації. Результати моделювання показали, що врахування уточнених параметрів для дітей 2–3 років збільшує час евакуації після початку руху з 81 с до 110 с, а загальний час – з 441 с до 470 с. Це свідчить, що використання однакових нормативних значень для всіх дітей дошкільного віку може занижувати розрахунковий результат. Подальші дослідження варто спрямувати на проведення натурних експериментів для визначення швидкості, щільності та пропускної здатності потоків дітей 2–3 і 4–6 років на горизонтальних ділянках, дверних прорізах, сходових клітках СК1 та зовнішніх сходах типу С3.

- [1]. Рубан А. В., Рашкевич Н. В., Отрош В. Ю. (2022). Моделювання евакуації людей при пожежі в програмному забезпеченні PATHFINDER [Modeling the evacuation of people in case of fire using PATHFINDER software]. *Modern Technologies for Solving Actual Society's Problems*. Edited by Oleksandr Nestorenko and Iryna Ostapolets. Katowice: Publishing House of University of Technology. P. 412–420. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/16048> [in Ukrainian].
- [2]. Майборода Р. І., Отрош Ю. А., Рашкевич Н. В., Мележик Р. С. (2023). Дослідження евакуації маломобільних груп населення з житлових висотних будинків при пожежі [Study of the evacuation of people with limited mobility from residential high-rise buildings in case of fire]. *Комунальне господарство міст*. Vol. 4, no. 178. P. 219–231. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-219-231> [in Ukrainian].
- [3]. Щолоков Е. Е., Рашкевич Н. В., Майборода Р. І., Отрош Ю. А. (2025). Удосконалення системи оповіщення та евакуації дітей з порушенням слуху у закладах освіти [Improvement of the warning and evacuation system for children with hearing

- impairments in educational institutions]. *Комунальне господарство міст*. Vol. 1, no. 189. P. 368–376. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-368-376> [in Ukrainian].
- [4]. Щолоков Е. Е., Майборода Р. І., Рашкевич Н. В., Отрош Ю. А., Балдук П. Г. (2025). Дослідження ефективності системи оповіщення та евакуації дітей з порушенням слуху у закладах освіти [Study of the effectiveness of the warning and evacuation system for children with hearing impairments in educational institutions]. *Механіка та математичні методи*. Vol. 7, no. 1. P. 26–47. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2025-7-1-26-47> [in Ukrainian].
- [5]. Кукузенко А. М., Рашкевич Н. В., Отрош Ю. А. (2022). Визначення стану безпеки шляхів евакуації [Determination of the safety condition of evacuation routes]. Матеріали Міжнародної науково-методичної конференції «Безпека людини у сучасних умовах». Харків: НТУ «ХПІ». P. 114–116. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/98018> [in Ukrainian].
- [6]. Щолоков Е. Е., Рашкевич Н. В., Отрош Ю. А., Майборода Р. І., Тригуб В. В. (2024). Евакуація при пожежі з дитячих ігрових майданчиків з повністю закритим устаткуванням [Evacuation in case of fire from children’s playgrounds with fully enclosed equipment]. *The 12th International Scientific and Practical Conference “Innovative Development of Science, Technology and Education”*. Vancouver: Perfect Publishing. P. 117–122. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20509> [in Ukrainian].
- [7]. Майборода Р., Рашкевич Н., Отрош Ю., Сур’янінов В. (2024). Забезпечення безпеки евакуації маломобільних груп населення за допомогою пожежних ліфтів [Ensuring the safety of evacuation of people with limited mobility using fire lifts]. Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. P. 112–113. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21751> [in Ukrainian].

REFINEMENT OF CALCULATION PARAMETERS FOR THE MOVEMENT OF PRESCHOOL CHILDREN DURING FIRE EVACUATION

The paper considers the refinement of calculation parameters for the movement of preschool children during fire evacuation. Scientific sources on evacuation modeling and the safety of movement routes are analyzed. Based on the modeling results, changes in evacuation time are shown when the movement parameters of children aged 2–3 years are taken into account. Directions for further full-scale studies are proposed.

УДК 624.012

ЛАБОРАТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ОБОЛОНОК ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОНУ ТА СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ

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

Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 65029, Україна,

Циліндрична оболонка як конструктивний елемент є важливою складовою сучасних інженерних споруд. Її ефективність та довговічність визначаються низкою факторів, серед яких ключову роль відіграють несуча здатність, деформативність та тріщиностійкість. Відомо, що введення дисперсного армування у бетон дозволяє суттєво підвищити міцність конструкції, збільшити її опір, а також забезпечити в'язкість руйнування.

У роботі [1] проведено параметричний аналіз статичної поведінки довгих циліндричних тонких бетонних оболонок під дією власної ваги. Використано програму ANSYS для моделювання впливу прольоту, центрального кута та товщини. Виявлено, що збільшення центрального кута призводить до зростання прогину, а товстіші оболонки краще протидіють втраті стійкості. Довгі оболонки демонструють більші деформації порівняно з короткими. Результати добре узгоджуються з попередніми моделями, що підтверджує достовірність висновків.

Описано будівництво тонкої оболонки JCHUPAR зі сталевібробетону – склепіння з чотирьох гіперболічних параболоїдів товщиною 6 см та прольотом 35,5 м [2]. У статті детально розглянуто процеси: вибір матеріалів, проектування, монтаж опалубки, укладання арматури, торкретування, догляд за бетоном та розпалубка. Показано ефективність використання сталевих волокон для забезпечення міцності та тріщиностійкості оболонки.

У статті [3] запропоновано волоконно-орієнтований чисельний метод моделювання прогресивного руйнування тонкостінних циліндричних оболонок (металевих чи композитних) під дією осьового стиску та згинального моменту. Метод враховує локальну реакцію кожного волокна, що дозволяє ефективно визначити граничну міцність оболонки. Показано можливість моделювання перерозподілу навантаження між зруйнованими та цілими елементами на стискуваній стороні та врахування пластичного руйнування на розтягнутій стороні, що часто ігнорується у чинних нормах. Результати чисельних експериментів підтверджують адекватність запропонованого підходу.

Розглянуто застосування сталевібробетону в тонких оболонках [4]. Проведено експериментальні випробування зразків оболонок на згин, результати яких порівняно з теоретичними моделями. Встановлено, що сталеві волокна забезпечують розвиток розтягувальних напружень по всій глибині тріщини, зменшують ширину тріщин, підвищують пластичність та циклічну тріщиностійкість конструкцій. Робота підтверджує доцільність використання сталевібробетону для тонких оболонок у практиці будівництва.

Досліджено нелінійні властивості матеріалу та вміст сталевих волокон у двошаровій бетонній оболонці подвійної кривизни [5]. Використано ANSYS для моделювання оболонки розміром 36×36 м, де нижній шар зі сталевими волокнами взаємодіє з верхнім шаром звичайного бетону. Показано, що навіть у нелінійній фазі бетон зберігає значну здатність до деформації, а кількість волокон суттєво впливає на напруження та переміщення. Враховано можливість ковзання між шарами, що змінює роботу конструкції.

Аналіз наукових джерел показує, що у сучасних дослідженнях циліндричних оболонок – як аналітичних, так і експериментальних – переважає увага до проблем стійкості. Водночас експериментальні роботи, присвячені залізобетонним та сталевібробетонним оболонкам, залишаються поодинокими. Саме тому цей напрям досліджень можна вважати актуальним і перспективним для подальшого розвитку.

Для експериментального дослідження були виготовлені моделі циліндричних оболонок відповідно до норм [6-8]. Загалом випробувано вісім оболонок в чотирьох товщинах: 45, 50, 55 та 60 мм, по дві оболонки кожної товщини, одна залізобетонна, друга сталевібробетонна. Утворююча поверхні оболонок є півколо радіусом 270 мм, довжина конструкції 2450 мм, розміри бортового елемента 45мм x 60 мм. Усередині кожного бортового елемента закладено по два арматурні стрижні діаметром 10 мм. Оболонка шарнірно спирається з кутів на пластину 100×100 мм. Бетон зразків-оболонок представлений класом C20/25 за міцністю на стиск. Смугами навантаження оболонка умовно розділена на п'ять панелей, стенд для випробувань представлено на рис. 1. Лабораторні випробування проводилися командою дослідників кафедр Будівельної механіки та Опору матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Перед випробуванням на кожну оболонку були змонтовані індикатори годинникового типу та наклеєні тензодатчики для вимірювання деформацій. В трьох середніх панелях індикатори та тензодатчики орієнтовані вздовж вісі оболонок, по крайніх панелях – по напрямку головних напружень (рис. 2).

Для фіксації прогинів використовували прогиноміри, що були встановлені всередині прольоту конструкції. Навантаження подавали ступенями з витримкою на кожному ступеню 10 хвилин, показники приладів

знімали до та після витримки. У процесі випробувань фіксувалася поява тріщин, кількість та характер їхнього розкриття, початкова та кінцева ширина розкриття тріщин.

В ході випробувань були отримані масиви даних, на основі яких побудовані графіки залежності деформацій та прогинів від навантаження.



Рис. 1. Випробувальний стенд

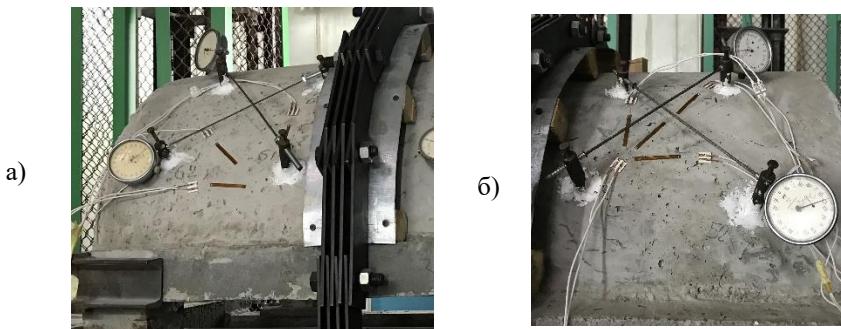


Рис. 2. Розташування вимірювальних приладів на крайніх панелях циліндричної оболонки: а – ліва панель, б – права панель

За результатами досліджень можна зробити висновки, що використання сталеві фібри у складі бетону для моделей циліндричної оболонки дозволяє підвищити несучу здатність в 1,33-1,54 рази. Наприклад, для оболонки товщиною 45 мм несуча здатність зросла від 96,4 кН для залізобетонного зразка до 128,6 кН для сталеві фібробетонного, а найбільше значення 182,2 кН зафіксовано для сталеві фібробетонної оболонки товщиною 60 мм. Встановлено, що додаткове дисперсне армування практично не впливає на

прогини оболонки. У процесі випробувань встановлено, що до моменту втрати несучої здатності в усіх оболонках формувалися тріщини з однаковою початковою шириною розкриття – 0,05 мм. Подальший розвиток тріщин супроводжувався збільшенням їхньої кінцевої ширини, що корелювало зі зростанням товщини оболонки та відповідним підвищенням несучої здатності. Найбільші значення навантаження, яке відповідає початку тріщиноутворення, зафіксовано для оболонок товщиною 50 та 55 мм. Загальна картина розвитку тріщин у всіх досліджених зразках виявилася подібною.

Експериментально підтверджено, що при порівнянні залізобетонних та сталевібробетонних оболонок додавання сталевих волокон у бетонну суміш забезпечує суттєве підвищення їхньої несучої здатності та тріщиностійкості. Отримані результати доводять ефективність використання дисперсного армування для покращення експлуатаційних характеристик оболонкових конструкцій та підкреслюють перспективність цього напрямку у сучасних дослідженнях і практиці будівництва.

[1]. Ahmed A. Yaseen, Majed A. Khalaf, Fareed H. Majeed *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. Vol. 10, No. 3, June, 2023, pp. 815-820.

[2]. Construction of JCHYPAR, a steel fiber reinforced concrete thin shell structure. A. Domingo, C. Lázaro, P. Serna. 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes. 2004. P.1143-1152.

[3]. Shen Li, Do Kyun Kim, Qing Quan Liang. Fibre-Based modelling for predicting the progressive collapse of cylindrical shells under combined axial compression and bending moment, *Engineering Structures*, Volume 272, 2022, 114988, ISSN 0141-0296.

[4]. Use of steel fiber reinforced concrete in thin shell structures: Evaluation of fiber performance through testing of shell specimens June 2000 Conference: IASS-IACM 2000. 4th International Colloquium on Computation of Shell and Spatial Structures: Chania-Crete. Greece. Alberto Domingo, C. Lazaro, P. Serna.

[5]. Thanh Quang Khai Lam and Thi My Dung Do. Analysis of nonlinear material and steel fiber content in the double layers concrete shell. AIP Conference Proceedings 2283, 020008 (2020).

[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 проєктування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. [Чинний від 2017–04–01]. ДП НДІБК, 2017. 35 с. (Інформація та документація).

[8]. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Вироби будівельні бетонні та залізобетонні збірні. Методи перевірення навантаженням. Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості. К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури.

LABORATORY TESTS OF REINFORCED CONCRETE AND STEEL FIBER CONCRETE SHELL MODELS

For the experimental study, eight models of cylindrical shells were manufactured and tested in four thicknesses: 45, 50, 55 and 60 mm, two shells of each thickness, one reinforced concrete, the other steel-fiber concrete. Concrete is represented by class C20/25 in terms of compressive strength. Before testing, clock-type indicators were mounted on each shell and strain gauges were glued to measure deformations. Deflections were recorded using deflection meters installed inside the span of the structure. The load was applied in stages with a hold at each stage of 10 minutes, the device readings were taken before and after the hold. During the tests, the appearance of cracks, the number and nature of their opening, the initial and final width of the crack opening were recorded. According to the results of the studies, it can be concluded that the use of steel fiber in the composition of concrete for cylindrical shell models allows to increase the bearing capacity by 1.33-1.54 times. It has been experimentally confirmed that when comparing reinforced concrete and steel-fiber concrete shells, the addition of steel fibers to the concrete mixture provides a significant increase in their load-bearing capacity and crack resistance. The results obtained prove the effectiveness of using dispersed reinforcement to improve the operational characteristics of shell structures.

УДК 517.98:004.8.

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО АНАЛІЗУ В ШТУЧНОМУ ІНТЕЛЕКТІ

Крадінова Т.А., Гуда О.В.

Луцький національний технічний університет, м.Луцьк

Сучасний розвиток інформаційних технологій та систем штучного інтелекту тісно пов'язаний із використанням математичних методів. Одним із найважливіших напрямів сучасної математики, що знаходить широке застосування у сфері штучного інтелекту, є функціональний аналіз. Його методи використовуються у машинному навчанні, нейронних мережах, обробці сигналів, комп'ютерному баченні та аналізі великих даних.

Функціональний аналіз досліджує властивості функцій, операторів та просторів нескінченної розмірності. Саме ці математичні конструкції дозволяють описувати складні процеси навчання штучних нейронних мереж,

оптимізацію параметрів моделей та обробку інформації у високовимірних просторах.

Наприклад, у машинному навчанні дані часто подаються у вигляді векторів великої розмірності. Для їх аналізу використовуються гільбертові та банахові простори, які є основними об'єктами функціонального аналізу. Особливе значення має простір квадратно-інтегрованих функцій

$$L^2(a, b) = \left\{ f(x) : \int_a^b |f(x)|^2 dx < \infty \right\}.$$

Оскільки в таких просторах можна аналізувати сигнали, виконувати обробку зображень, моделювати мовні процеси. Методи функціонального аналізу дозволяють досліджувати збіжність алгоритмів навчання та стабільність моделей штучного інтелекту.

Нейронні мережі також є основою сучасного штучного інтелекту. Процес навчання мережі фактично є задачею оптимізації функціонала похибки. Однією з найважливіших задач є мінімізація функції втрат:

$$J(w) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, w))^2,$$

де x_i — вхідні дані; y_i — правильні відповіді; w — параметри мережі. Функціональний аналіз допомагає досліджувати властивості операторів нейронних мереж, аналізувати процес збіжності градієнтних методів, зменшувати похибки навчання. Завдяки цьому створюються ефективні алгоритми розпізнавання мовлення, текстів, зображень та відео.

Важливим прикладом застосування функціонального аналізу є метод опорних векторів (SVM). Цей метод використовується для класифікації та прогнозування даних. Основою SVM є ядра функція:

$$K(x, y) = \langle \varphi(x), \varphi(y) \rangle.$$

Вона дозволяє переводити дані у простір більшої розмірності, де їх легше розділити. Метод опорних векторів застосовується у медичній діагностиці, системах безпеки, фінансовому прогнозуванні.

Функціональний аналіз широко використовується у цифровій обробці сигналів та комп'ютерному баченні. Для аналізу зображень застосовуються перетворення Фур'є

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

та вейвлет-аналіз. Цей метод дозволяє виділяти шуми, покращувати якість зображень та розпізнавати об'єкти. Такі технології активно застосовують у системах розпізнавання облич, медичній діагностиці та робототехніці.

Подальший розвиток штучного інтелекту неможливий без удосконалення математичних методів, серед яких функціональний аналіз займає одне з провідних місць. Його методи дозволяють працювати з багатовимірними даними, аналізувати функції та оператори, будувати

ефективні алгоритми навчання нейронних мереж. А це, зокрема сприяє розвитку машинного навчання, комп'ютерного бачення, обробки природної мови, систем прогнозування, інтелектуальних інформаційних технологій.

- [1]. Yao J., Mueller J., Wang J. L. Deep Learning for Functional Data Analysis with Adaptive Basis Layers. Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML 2021). 2021. P. 11898–11908.
- [2]. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016. 800 p.
- [3]. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving partial differential equations. Journal of Computational Physics. 2019. Vol. 378. P. 686–707.
- [4]. Muandet K., Fukumizu K., Sriperumbudur B., Schölkopf B. Kernel Mean Embedding of Distributions: A Review and Beyond. Foundations and Trends in Machine Learning. 2017. Vol. 10, No. 1-2. P. 1–141.
- [5]. Sarkka S., Svensson L. Non-linear Filtering: Functional Analysis and Stochastic Calculus Approaches. IEEE Transactions on Signal Processing. 2023. Vol. 71. P. 1420–1435.

APPLICATION OF FUNCTIONAL ANALYSIS ELEMENTS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE

This paper explores the role of functional analysis as a fundamental mathematical framework for modern artificial intelligence and machine learning systems. It highlights the transition from finite-dimensional linear algebra to infinite-dimensional function spaces (Banach and Hilbert spaces), which allows neural network architectures to be treated as mathematical operators. The application of the $L^2(X)$ space in signal processing is described, alongside the mathematical foundations of kernel methods and loss function optimization theory. The utilization of spectral and wavelet analysis in computer vision tasks is also examined. The paper demonstrates that the toolkit of functional analysis is critically essential for ensuring the convergence, stability, and theoretical soundness of AI models.

УДК 691.32:625.07

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ФІБРОБЕТОНУ ДЛЯ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ В УМОВАХ АГРЕСИВНОГО СЕРЕДОВИЩА

**Зятюк Ю.Ю., к.т.н., доц., Поліщук О.М., аспірант, 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

Однією з основних проблем жорсткого дорожнього одягу є руйнування під дією вологи, температурних коливань і хімічних реагентів. Агресивні впливи на жорсткий дорожній одяг формуються під дією природних та антропогенних факторів. Сильнокислі середовища ($\text{pH} \approx 3$) виникають внаслідок впливу промислових викидів, кислотних опадів та стічних вод. Слабокислі умови ($\text{pH} \approx 5$) характерні для поверхневого стоку з доріг та ґрунтових вод, що містять органічні кислоти. Нейтральне середовище ($\text{pH} \approx 7$) притаманне природним водам, однак навіть у цьому випадку агресивність може визначатися наявністю сульфатів і хлоридів. Лужні середовища ($\text{pH} \approx 13$) формуються під впливом протижелезних реагентів, промислових відходів та продуктів гідратації цементу. Вказані фактори суттєво впливають на довговічність бетонних покриттів і повинні враховуватись при проектуванні складу фібробетону. Це потребує вдосконалення складу бетону шляхом введення ефективних армуючих добавок [1,2, 3].

Останні дослідження демонструють ефективність дисперсного армування як інструменту контролю тріщиноутворення та підвищення енергопоглинальної здатності бетону. Зокрема, використання окремих типів фібри (сталеві, полімерної, базальтової, скляної) дозволяє покращити окремі механічні характеристики матеріалу. Водночас встановлено, що жоден із видів волокон не забезпечує комплексного підвищення всіх експлуатаційних показників, особливо в умовах агресивного впливу середовища. У цьому контексті комбіноване армування розглядається як перспективний підхід, що дозволяє поєднати позитивні ефекти різних типів фібри та забезпечити багаторівневий механізм стримування розвитку тріщин [4, 5, 6].

Метою даного дослідження є встановлення закономірностей впливу комбінованого армування на механічні характеристики та довговічність бетону за дії агресивних середовищ, а також визначення раціональних параметрів складу фібробетону, що забезпечують підвищення його експлуатаційної надійності.

Накопичений практичний досвід використання фібробетону підтверджує його високу ефективність у конструкціях, де важливими є підвищена тріщиностійкість, ударна витривалість та довговічність. Найбільший ефект від застосування сталевोї фібри досягається в залізобетонних і тонкостінних елементах, а також у спорудах, що сприймають значні динамічні та циклічні навантаження. До таких об'єктів належать хвилюзахисні та портові споруди, аеродромні та дорожні покриття, фортифікаційні та сейсмостійкі конструкції, палі, трубопроводи та резервуари [7, 8].

Попри численні переваги дисперсного армування, кожен тип фібри має певні обмеження, які необхідно враховувати при проектуванні та виготовленні фібробетонів. При застосуванні різних фібр важливим технологічним недоліком є схильність волокон до утворення згустків («їжаків») та їх нерівномірного розподілу в бетонній суміші, що потребує використання спеціального дозувального обладнання та ретельного контролю процесу змішування [2-8]. Основні дослідження були проведені з застосування математичного планування експериментів [9], 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 В2 [10], Змінними факторами було обрано: вміст поліпропіленової фібри, (PF), кг/м³, (X1 = 2±1 кг/м³), вміст сталевий фібри, (StF), кг/м³ (X2 = 40±40 кг/м³). У ході досліджень для оцінки впливу фібри на властивості бетонних сумішей та бетонів виготовляли стандартні зразки-куби (10×10×10 см), що тверділи спочатку у нормальних умовах 28 діб, а потім на 180 діб зразки занурювали у агресивне середовище (кисле (pH=3), лужне (pH=13), слабокисле (pH=5) та нейтральне (pH=7)) залишаючи для порівняння контрольні зразки. Визначали міцність при стиску 4-ох зразків-кубів у віці 28 діб.

Вибір вмісту фібри був обґрунтований з огляду на їх оптимальну кількість згідно попередніх досліджень та огляду літературних джерел [1, 4, 8-14]. Рухомість сумішей в усіх точках плану була постійною та становила 12...15 см по осадці стандартного конуса Абрамса, для цього підбирали необхідну кількість добавки суперпластифікатора для кожної точки плану. Вміст води та ПЦ-III/A-III-500 були постійними (В=135 л/м³, ПЦ=300 кг/м³), відповідно В/Ц було 0,45. Після обробки і статистичного аналізу отриманих експериментальних даних були побудовані експериментально-статистичні моделі міцності на стиск дорожніх фібробетонів.

Експериментально-статистична модель міцність при стиску
КТ (pH=7)

$$f_{c,m}^{KT} = 51,68 + 1,85 \cdot x_1 + 4,45 \cdot x_2 - 0,27 \cdot x_1 x_2 - 0,27 \cdot x_1^2 - 0,83 \cdot x_2^2 \quad (1)$$

Сіль (Хлориди) (pH=5)

$$f_{c,m}^s = 50,21 + 2,33 \cdot x_1 + 4,77 \cdot x_2 - 0,66 \cdot x_1 x_2 - 0,16 \cdot x_1^2 - 0,9 \cdot x_2^2 \quad (2)$$

Лужне середовище (pH=13)

$$f_{c,m}^s = 47,9 + 2,85 \cdot x_1 + 5,65 \cdot x_2 + 0,12 \cdot x_1 x_2 - 0,48 \cdot x_1^2 - 1,03 \cdot x_2^2 \quad (3)$$

Кислота (pH=3)

$$f_{c,m}^s = 41,92 + 3,28 \cdot x_1 + 5,17 \cdot x_2 + 1,33 \cdot x_1 x_2 + 0,88 \cdot x_1^2 - 1,2 \cdot x_2^2 \quad (4)$$

Зі збільшенням вмісту сталеві фібри в досліджуваному діапазоні за сталого водов'язучого відношення спостерігається підвищення міцності на згин у середньому на 12...16 %. Найбільш виражений ефект досягається за мінімального вмісту поліпропіленової фібри. При цьому введення поліпропіленового волокна в кількості до 1,5 кг/м³ практично не впливає на приріст міцності, тоді як збільшення його дозування до 3,0 кг/м³ забезпечує додаткове зростання міцності до 10 %. Аналогічно до сталеві фібри, максимальний ефект від поліпропіленового армування спостерігається за мінімальної витрати іншого виду волокна та в'язучого.

Аналіз отриманих моделей свідчить про наявність суттєвої взаємодії між факторами. Позитивний вплив збільшення вмісту як сталеві, так і поліпропіленові фібри поступово зменшується при наближенні до верхніх меж варіювання, що вказує на існування області раціональних дозувань. Для сталеві фібри вона становить 80...100 кг/м³, а для поліпропіленові — 2...3 кг/м³. За таких співвідношень міцність на згин досягає 15...17 МПа при мінімальній витраті в'язучого та 17...20 МПа при його максимальному вмісті.

Висновки. Концепція синергії комбінованого армування фібрами полягає в тому, що волокна з різними механічними властивостями, розмірами та функціональним призначенням взаємодіють у бетонній матриці більш ефективно, забезпечуючи комплексне покращення міцності при стиску, розтягу та згині, а також підвищення в'язкості руйнування та довговічності. Водночас до основних обмежень таких систем належать підвищена вартість реалізації та недостатня кількість переконливих довгострокових досліджень, що підтверджують отримані ефекти. Отримані результати показали, що застосування комбінованого армування у складі сталеві фібри та поліпропіленові фібри сприяє підвищенню міцності при стиску та згині в усіх досліджених середовищах протягом терміну експозиції до 180 діб.

[1]. 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.

[2]. Hussain I, Ali B, Akhtar T, Jameel MS, Raza SS. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Stud Constr Mater*. 2020;13: e00429. [https:// doi. org/ 10. 1016/j. cscm. 2020. e00429](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429).

- [3]. Małek M, Jackowski M, Łasica W, Kadela M. Influence of polypropylene, glass and steel fiber on the thermal properties of concrete. *Materials*. 2021;14(8):1888. <https://doi.org/10.3390/ma14081888>.
- [4]. Naaman A.E. Fiber reinforced concrete: A state of the art. – Detroit: HPFRCC Workshop, 2024. – 64 p. URL: <http://www.personal.umich.edu/~naaman/downloads/FRC-State-of-the-Art.pdf> (дата звернення: 12.02.2026).
- [5]. Dziomdziora, P.; Smarzewski, P. Effect of Hybrid Fiber Compositions on Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete: A Comprehensive Review. *Materials* 2025, 18, 2426. <https://doi.org/10.3390/ma18112426>
- [6]. Khaleel, B. A., Dawood, E. T. Evolution of ultra high performance concrete using hybrid fibers: a review. *Discover Concrete and Cement*. 2025. Vol. 1, No. 1. Article 2. DOI: 10.1007/s44416-025-00001-z.]
- [7]. Li, Y., Jonathan, G.B. and Merveille, K.K. (2025) Mechanical Performance of Ultra-High Performance Concrete Reinforced with Micro Steel Fibers: Experimental and Numerical Investigation under Uniaxial Compression and Flexural Loading. *Open Journal of Civil Engineering*, 15, 182-204. <https://doi.org/10.4236/ojce.2025.152011>
- [8]. Elhawary, E. I. N., Elsafoury, A. H., Ahmad, S. S. E. (2022). Durability of hybrid fiber reinforced concrete at various environmental media. *Sci. Rev. Eng. Env. Sci.*, 2946. DOI 10.22630/srees.2946
- [9]. 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.
- [10]. 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.
- [11]. 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>.
- [12]. Kroviakov S. O., Hedulian D. Iu., 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. C.76-84. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-87-76-84>.
- [13]. Song Z., Li S., Brouwers H. J. H., Yu Q. Corrosion risk and corrosion-induced deterioration of ultra-high performance fiber-reinforced concrete containing 158 initial micro-defects. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 142, 105208, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105208>.
- [14]. Polishchuk O, Ziatyuk Y, Fursovych M, Supruniuk V, Romaniuk V. Combined Reinforcement as a Means of Increasing the Durability of Rigid Pavement. *MSF* 2025;1170:75–9. <https://doi.org/10.4028/p-bqtxa8>.

OPTIMIZATION OF FIBER-REINFORCED CONCRETE MIX DESIGN FOR RIGID PAVEMENTS UNDER AGGRESSIVE ENVIRONMENTAL CONDITIONS

The concept of synergy in combined-hybrid fiber reinforcement is based on the premise that fibers with different mechanical properties, dimensions, and functional roles interact within the concrete matrix more effectively, providing a comprehensive improvement in compressive, tensile, and flexural strength, as well as enhanced fracture toughness and durability. At the same time, the main limitations of such systems include higher implementation costs and the limited availability of convincing long-term studies confirming the reported effects. The obtained results showed that the use of hybrid reinforcement consisting of steel and polypropylene fibers contributes to an increase in compressive strength in all investigated environments during an exposure period of up to 180 days.

УДК 544.77:66.063.6(063)

TOPOLOGICAL GENERALIZATION OF THE LAWS OF STRUCTURE FORMATION PROCESSES IN DISPERSED SYSTEMS AND MATERIALS

Trofimova L.E., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

It is known that building composites (solutions and concretes based on mineral or organic binders, slips for the production of ceramics, paints and varnishes, and many similar dispersions) can be interpreted as self-organizing systems whose evolution in space and time is accompanied by the formation of dissipative structures. Since most of the above-mentioned systems are characterized by abrupt phenomena caused by a disruption in the continuity of developing processes of various types, it is proposed to supplement the synergetic approach to the study of the features of structure formation with methods of catastrophe theory, which investigates sudden qualitative restructurings of systems resulting from a smooth change in external conditions or internal properties. It should be emphasized that the research program is based on modern concepts and principles of physicochemical dynamics—a new scientific direction in the physicochemistry of dispersed systems, developed by N.B. Uriev and his school [1-5].

The traditional method of collecting information necessary for establishing the patterns of formation, stability maintenance, or destruction of dispersed structures under dynamic conditions involves constructing and analyzing complete

rheological curves. The flow curves represent the dependence of the effective viscosity η on the shear stress P (or strain rate gradient $\dot{\epsilon}$) and the $\dot{\epsilon}$ dependence on P under the mandatory fulfillment of the condition of isotropy of structure destruction in the working gap of the viscometer. Complete rheological curves $\lg \eta$ (P) of structured dispersed systems were first described in [6] for a 10% suspension of sodium bentonite and a 20% suspension of natural bentonite.

According to the well-known classification of Bartenev and Ermilova [7], structured dispersed systems are characterized by the existence of two types of flow curves. The well-studied rheological curves of type I are characterized by an unambiguous dependence of viscosity and shear rate gradient on stress. The less-studied curves of type II exhibit regions of viscosity or strain rate variation, which correspond to an ambiguous change in stress: a drop in P over a certain range of $\dot{\epsilon}$ values. This anomalous effect is manifested in the S-shaped behavior of the flow curves. It should be noted that for both types of dependences, the effective viscosity is always unambiguously determined [7] by the strain rate gradient.

S-shaped rheological curves were obtained by Rehbinder et al. [6] for certain clay suspensions and investigated by Bartenev and Ermilova [8] within the framework of their proposed molecular-kinetic theory of non-Newtonian flow (Fig. 1). A similar ambiguous dependence is also presented and explained in the work of Bartenev, Baburin, and Izykson [9] for an aqueous suspension of cellulose (Fig. 2). The description of the curves considered is based on the assumption that the shear flow extends across the entire gap of the viscometer. In this case, the decrease in shear stress and its subsequent increase with increasing strain rate occurs [1] smoothly over a wide range of $\dot{\epsilon}$ change.

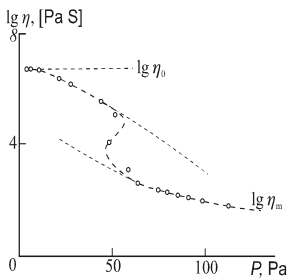


Fig. 1.

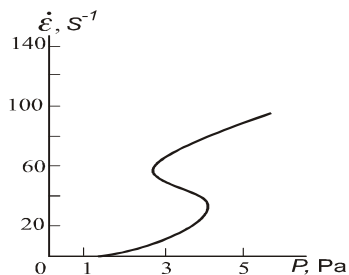


Fig. 2.

Fig. 1. Dependence of the logarithm of viscosity η on the shear stress P for a 10% Na-bentonite suspension. η_0 - is the highest viscosity of a practically intact structure, and η_m - is the lowest viscosity of a highly degraded structure

Fig. 2. Dependence of the strain rate $\dot{\epsilon}$ on the shear stress P for an aqueous suspension of cellulose (bleached sulfate, concentration 2.1%)

To further develop our understanding of the patterns and mechanisms of formation, stability, and destruction of structured dispersions, it is advisable to supplement the explanation of their anomalous behavior with the features of coagulation under dynamic conditions using synergetics and catastrophe theory models. As is well known, synergetics [10–12] studies the processes of self-organization, the relatively stable existence, and disintegration of structures of various natures that form in systems far from equilibrium; and catastrophe theory describes [13, 14] the threshold situations in which dissipative structures arise, are maintained, and lose stability. Within the framework of this approach, dispersed systems under dynamic conditions are treated as self-organizing, the evolution of which in space and time is accompanied by the formation of dissipative structures. Moreover, the entire diversity of real abrupt changes in the states of such systems (i.e., their qualitative restructuring), caused by smoothly changing external influences, is described using a small, finite number of canonical models—catastrophes.

As noted above, for some systems, a family of rheological curves can be obtained that are characterized by an increasingly pronounced *S*-shape with increasing solids concentration. This tendency, in particular, is clearly observed in the flow of aqueous dispersions of calcium bentonite (Fig. 3). It is proposed to use the "ruffle" catastrophe to study the characteristics of shear flow, since the steady-state curve considered represents the cross sections of this model at fixed values of φ (Fig. 3). A catastrophe of this type describes the process under study using a single state variable (η or ε), two control parameters P and φ , and is represented by a qualitative model (surface) in the three-dimensional space of these generalized coordinates. The most interesting property of this surface is the presence of two fold lines, starting at the so-called cusp point B and forming a bifurcation curve on the plane of the control parameters P , φ – a semi-cubical parabola with a cusp at point B_I . These points correspond [3] to the first critical concentration φ_0 , upon reaching which a spatial structural network begins to emerge and anomalies in the flow of the dispersed system are observed. Stable stationary regimes geometrically

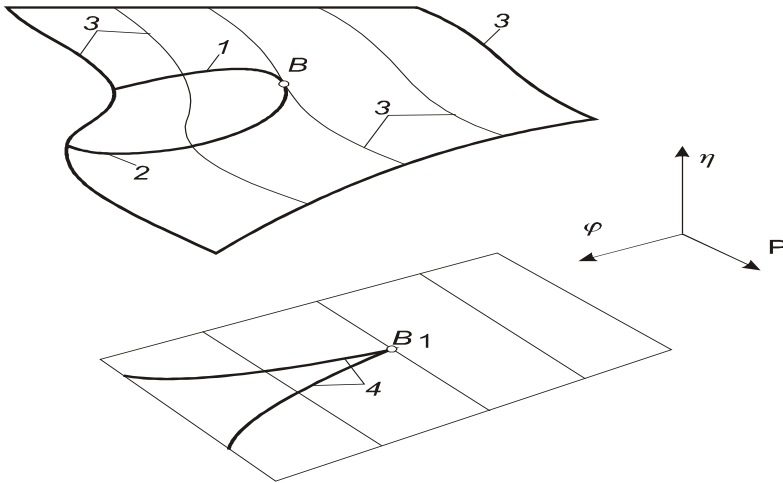


Fig. 3. Schematic representation of the dependence of viscosity η of an aqueous dispersion of calcium bentonite on the shear stress P and the content of the dispersed phase φ ("ruffle" model, maximum delay principle): 1 and 2 – "fold" lines; 3 - cross sections of the model; B – "ruffle" point; 4 - bifurcation curves; B_1 - bifurcation point

correspond to points on the surface of the "assemblage" catastrophe manifold lying on the upper and lower sheets outside the folding curve, while unstable regimes correspond to points on the middle sheet inside the folding curve (the "inaccessibility region," which can apparently be interpreted as a zone of unrealizable states of isotropic structural destruction, even with increasing intensity of external influences).

Thus, the qualitative coherence between the topological model representations and the known curves (Figs. 1, 2) is quite meaningful, as it leads to the conclusion that the nature of the relationships under discussion is characterized by a very specific pattern—a correspondence to the "ruffle" model.

[1] 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.

[2] 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.

[3] N.B. Uriev, Highly Concentrated Disperse Systems [Vysokokontsentrirovannye dispersnye sistemy], Khimiia, Moscow, 1980.

- [4] N.B. Uriev, Highly Concentrated Disperse Systems and Materials [Vysokokontsentririvannye dispersnyye sistemy i materialy], Tekhpoligriftsentr, Moscow, 2018.
- [5] V.N. Tarakanov, N.B. Uriev, Ya.P. Ivanov, R. Kozilkova, Effects of Coarse Particles on the Rheology of Highly Concentrated Suspensions, in: Proceedings of the 5th National Conference on Mechanics and Technology of Composite Materials, Sofia, 1988, pp. 436–443.
- [6] L.A. Abduragimova, P.A. Rebinder, N.N. Serb-Serbina, Elastic-viscous properties of thixotropic structures in aqueous suspensions of bentonite clays [Uprugo-vyazkostnyye svoystva tiksotropnykh struktur v vodnykh suspenziyakh bentonitovykh glin], Kolloidn. Zh. 17(3) (1955) 184-195.
- [7] G.M. Bartenev, N.V. Ermilova, Toward a theory of the rheological properties of solid-like dispersed structures. Two Types of Rheological Flow Curves [K teorii reologicheskikh svoystv tverdoobraznykh dispersnykh struktur. Dva tipa reologicheskikh krivykh techeniya], Kolloidn. Zh. 31(2) (1969) 169-175.
- [8] G.M. Bartenev, N.V. Ermilova, Toward a theory of the rheological properties of solid-like dispersed structures. Two Flow Mechanisms [K teorii reologicheskikh svoystv tverdoobraznykh dispersnykh struktur. Dva mekhanizma techeniya], Kolloidn. Zh. 29(6) (1967) 771-778.
- [9] G.M. Bartenev, S.V. Baburin, B.M. Izykson, Features of Dispersed Media Flow in the Region of Viscosity Superanomalies [Osobennosti techeniya dispersnykh sred v oblasti sverkhanomalii vyazkosti], Kolloidn. Zh. 42(5) (1980) 826-830.
- [10] G. Nicolis, I. Prigogine, Self-Organization in Nonequilibrium Systems, John Wiley & Sons, New-York, 1977.
- [11] H. Haken, Synergetiks. An introduction, 3rd edn., Springer, Berlin, 1983.
- [12] V. Sukhanov, V. Vyrovoy, O. Korobko, Material structure in structure construction [Struktura materiala v strukture konstrukttsii], OSACEA, Odesa, 2022.
- [13] R. Thom, Structural Stability and Morphogenesis, Benjamin, New York, 1972.
- [14] L. Trofimova, Modeling and optimization of technology and physics-mechanical properties of composite materials, Key Engineering Materials. 864 (2020) 59-65.

ТОПОЛОГІЧНЕ УЗАГАЛЬНЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМАХ ТА МАТЕРІАЛАХ

Розглянуті деякі закономірності процесів структуроутворення в дисперсних системах та матеріалах з позицій синергетики і теорії катастроф. Встановлено, що поява характерних S-зламів на реологічних кривих таких сумішей інформативно описується і аналізується на основі стандартної моделі «збірка». Показано, що згода між експериментальними і модельними реологічними кривими полягає не лише в їх зовнішній подібності, але і в логічному узагальненні.

УДК 691.32:620.1

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ ТА ДЕФОРМІВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНУ ТА СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ

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

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

Підвищення міцнісних і деформівних характеристик бетону є актуальним завданням сучасного будівельного матеріалознавства, особливо з огляду на крихкий характер його руйнування та низьку міцність при розтягу. Одним із перспективних напрямів вирішення цього завдання є використання сталеві фібри, яка сприяє стримуванню розвитку тріщин, перерозподілу напружень у бетонній матриці та підвищенню енергоємності руйнування матеріалу [1-4]. Сталеві фібробетон розглядається як різновид фібробетону, що може застосовуватися у будівельних конструкціях з урахуванням вимог чинних нормативних документів щодо проектування та виготовлення конструкцій із фібробетону [5-6]. Оскільки ефективність сталеві фібробетону залежить від вмісту армувального компонента, важливим є експериментальне дослідження впливу різної кількості фібри на міцнісні та деформівні характеристики бетону.

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу різного об'ємного вмісту сталеві фібри на міцнісні та деформівні характеристики бетону шляхом порівняння результатів випробувань зразків зі звичайного бетону та сталеві фібробетону.

Експериментальні дослідження виконували у науково-дослідній будівельній лабораторії Луцького НТУ на зразках зі звичайного бетону та сталеві фібробетону з різним об'ємним вмістом сталеві фібри. Для оцінювання міцнісних і деформівних характеристик було виготовлено кубічні зразки розміром 150×150×150 мм, циліндричні зразки розміром 150×300 мм, призматичні зразки розміром 150×150×600 мм для випробувань на одноосьовий стиск, а також призматичні зразки розміром 100×100×600 мм для випробувань на одноосьовий центральний розтяг. Зразки виготовляли на основі бетону класу С25/30. Для дисперсного армування використовували анкерну сталеву фібру довжиною 50 мм і діаметром 1 мм, яку додавали до бетонної суміші у кількості $\mu = 1,0 \%$, $\mu = 1,5 \%$ та $\mu = 2,0 \%$ за об'ємом. Водцементне співвідношення становило близько $В/Ц = 0,58$.

Випробування зразків на одноосьовий стиск проводили на гідравлічному пресі ПСУ-250, а випробування призматичних зразків на одноосьовий розтяг – на універсальній випробувальній машині УММ-50. Поздовжні деформації призматичних зразків під час стиску і розтягу вимірювали за допомогою чотирьох індикаторів стрілкового типу з ціною поділки 0,01 мм та 0,001 мм. Вимірювальна база між опорами індикаторів становила $l = 310$ мм і розташовувалася в центральній частині зразка. Отримані значення навантажень і деформацій використовували для побудови експериментальних діаграм «напруження-деформація» та аналізу деформаційної поведінки матеріалу.

Модуль деформації при стиску визначали із діаграм «напруження-деформація» у квазілінійному інтервалі 0,3-0,5 f_c , де f_c – максимальне напруження при стиску. Цей інтервал обрано для зменшення впливу початкової нестабільності навантаження та подальшого нелінійного деформування матеріалу перед руйнуванням.

За результатами випробувань призматичних зразків на одноосьовий розтяг встановлено, що введення сталеві фібри суттєво підвищує міцність бетону при розтягу. Середня міцність зразків без фібри становила 2,65 МПа. Для сталеві фібробетону з вмістом фібри $\mu = 1,0$ % вона зросла до 3,29 МПа, що відповідає приросту на 24,2 %. При $\mu = 1,5$ % міцність становила 4,04 МПа, тобто збільшилася на 52,5 %, а при $\mu = 2,0$ % досягла 4,15 МПа, що відповідає приросту на 56,6 % порівняно зі звичайним бетоном.

Аналіз діаграм «напруження-деформація» при розтягу показав, що зразки звичайного бетону характеризуються меншою деформаційною здатністю. Відносні деформації при досягненні максимального напруження для бетону без фібри становили 0,044-0,099 ‰, тоді як для сталеві фібробетонних зразків перебували в межах 0,079-0,135 ‰ залежно від вмісту фібри. Це свідчить про вплив сталевих волокон не лише на підвищення міцності при розтягу, а й на зміну характеру деформування матеріалу.

Найбільш інтенсивне зростання міцності при розтягу спостерігалось при збільшенні вмісту фібри до $\mu = 1,5$ %. Подальше підвищення її кількості до $\mu = 2,0$ % забезпечило лише незначний додатковий приріст міцності: з 4,04 МПа до 4,15 МПа, тобто приблизно на 2,7 % порівняно із серією $\mu = 1,5$ %. Отже, основний ефект дисперсного армування при розтягу проявляється у підвищенні міцності, збільшенні деформаційної здатності та більш поступовому характері роботи сталеві фібробетону порівняно зі звичайним бетоном.

За результатами випробувань призматичних зразків на одноосьовий стиск встановлено, що введення сталевोї фібри також впливає на міцнісні та деформівні характеристики бетону, однак цей вплив має нелінійний характер. Середня міцність звичайного бетону становила 29,64 МПа. Для сталевібробетону з вмістом фібри $\mu = 1,0\%$ вона зросла до 31,53 МПа, тобто на 6,4 %. При $\mu = 1,5\%$ міцність досягла 39,30 МПа, що відповідає приросту на 32,6 %, а при $\mu = 2,0\%$ становила 38,43 МПа, тобто перевищувала показник звичайного бетону на 29,7 %, але була дещо нижчою, ніж для серії 1,5 %.

Аналіз деформацій при стиску показав, що звичайний бетон характеризується «жорсткішою» роботою та меншими відносними деформаціями при досягненні максимального навантаження. Для зразків без фібри вони становили 0,8-1,06 ‰, тоді як для сталевібробетону зростали до 1,14-1,80 ‰ залежно від вмісту фібри. Це свідчить про підвищену деформативність сталевібробетону та більш плавний характер його роботи під стискальним навантаженням.

Модуль деформації звичайного бетону в інтервалі $0,3-0,5 f_c$ становив у середньому 35,70 ГПа. Для сталевібробетону з вмістом фібри $\mu = 1,0\%$ середнє значення модуля становило 28,06 ГПа, при $\mu = 1,5\%$ – 34,13 ГПа, а при $\mu = 2,0\%$ – 27,41 ГПа. Найбільш збалансовані результати за міцністю та деформівними характеристиками при стиску отримано для серії з вмістом фібри $\mu = 1,5\%$.

Додатково проаналізовано результати випробувань кубічних і циліндричних зразків на стиск. Для кубічних зразків середня міцність зросла з 31,89 МПа для бетону без фібри до 33,56 МПа при $\mu = 1,0\%$, до 36,76 МПа – при $\mu = 1,5\%$ та 37,34 МПа при $\mu = 2,0\%$. Для циліндричних зразків відповідні значення становили 25,49 МПа, 27,33 МПа, 30,75 МПа та 31,12 МПа. Отримані результати підтверджують підвищення міцності бетону на стиск при використанні сталевої фібри, однак приріст міцності при переході від 1,5 % до 2,0 % є незначним.

Таким чином, результати експериментальних досліджень підтвердили «позитивний вплив» сталевої фібри на міцнісні та деформівні характеристики бетону. Найбільший ефект від дисперсного армування встановлено при одноосьовому розтягу, де збільшення вмісту фібри до 1,5-2,0 % забезпечило суттєве підвищення міцності та деформаційної здатності порівняно зі звичайним бетоном. Вплив фібри при стиску мав нелінійний характер: найвищу міцність призматичних зразків отримано при вмісті фібри $\mu = 1,5\%$, тоді як збільшення її кількості до $\mu = 2,0\%$ не забезпечило додаткового

приросту. Серед досліджених складів найбільш раціональним можна вважати вміст сталевих фібри $\mu = 1,5 \%$, оскільки він забезпечив значне підвищення міцності при стиску та розтягу без істотного збільшення витрати армувального компонента. Отримані результати можуть бути використані як експериментальна база для подальших досліджень деформативної роботи сталевібробетонних елементів та їх чисельного моделювання.

- [1]. Denesh M, Senthilkumar V. Experimental study on the steel fiber reinforced concrete. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2023; 11:710–713. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.48670>.
- [2]. Gope LK, Yadav B, Raj R, Kumar S. Comparative study on normal and steel fibre reinforced concrete. International Journal of Science and Technology. 2025;2(4):189–194. <https://doi.org/10.70558/IJST.2025.v2.i4.241122>.
- [3]. Андрійчук О.В., Громов Д.Ю. Вплив дисперсного армування на фізико-механічні властивості бетону: огляд // Сучасне будівництво та архітектура. 2026. № 15. С. 51–67. DOI: 10.31650/2786-6696-2026-15-51-67.
- [4]. Андрійчук О.В., Громов Д.Ю. Встановлення кореляційної залежності між неруйнівними та руйнівними випробуваннями бетону і сталевібробетону // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк, 2025. Вип. 24. С. 40–51. DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-03.
- [5]. ДСТУ-Н Б В.2.6-78:2015. Конструкції будинків і споруд. Дисперсноармовані залізобетонні конструкції. Настанова з проектування та виконання робіт. Київ, 2015. 49 с.
- [6]. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016. Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Київ, 2016. 32 с.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF ORDINARY CONCRETE AND STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

The paper presents the results of an experimental study on the influence of steel fiber content of 1.0 %, 1.5 %, and 2.0 % by volume on the strength and deformation characteristics of ordinary concrete and steel fiber reinforced concrete. The study was carried out on cubic, cylindrical, and prismatic specimens tested under compression and uniaxial tension. It was found that the addition of steel fibers had the most significant effect on tensile strength, which increased by 24.2-56.6 % compared with ordinary concrete. Compression tests also showed an increase in strength. However, this effect was nonlinear. Among the studied mixtures, the steel fiber content of 1.5 % was found to be the most effective, as it provided a significant increase in compressive and tensile strength without a substantial increase in the amount of reinforcing component.