



КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ



МІНІСТЕРСТВО
ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ



УКРАЇНЬСЬКА РАДА
ІНЖЕНЕРІВ-БУДІВЕЛЬНИКІВ



БУДІВЕЛЬНА
ПАЛАТА
УКРАЇНИ



АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА
УКРАЇНИ



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-
ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ»



VI Міжнародна науково-практична конференція «ЕНЕРГООЩАДНІ МАШИНИ І ТЕХНОЛОГІЇ»

20-21 травня 2025 року

Присвячено 95-річчю з дня заснування КНУБА

Матеріали конференції

Київ 2025

8. Mousavi-Kamazani, M., Zinatloo-Ajabshir, S., & Ghodrati, M. (2020). One-step sonochemical synthesis of Zn(OH)₂/ZnV₃O₈ nanostructures as a potent material in electrochemical hydrogen storage. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 31, 17332–17338. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04289-4>.

РЕЛАКСАЦІЙНІ ЯВИЩА ПРИ УЩІЛЬНЕННІ АРБОЛІТОВИХ ТА ПОЛІСТИРОЛБЕТОННИХ СУМІШЕЙ

Микола Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-4073-1233),

Василь Ведмідь, аспірант¹ (ORCID: 0000-0003-1514-1212),

Тетяна Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-2387-8575),

Максим Пирлик, аспірант¹ (ORCID: 0009-0006-1343-9516),

¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаценка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. Розглянуто особливості динамічного ущільнення легких бетонів, зокрема полістиролбетонних та арболітових сумішей, які належать до класу в'язкопружних пористих матеріалів. Проаналізовано їхню структурну будову, фізико-механічні властивості та релаксаційну поведінку під дією вібраційного навантаження. Обґрунтовано доцільність використання математичних моделей Кельвіна–Фойгта та Максвелла для опису напружено-деформованого стану відповідно до типу заповнювача. Наведено аналітичні вирази для визначення амплітуди, резонансної частоти, фазового зсуву та декременту затухання, що дозволяє моделювати роботу системи «віброуюча платформа – бетонна суміш» як масово-пружну систему з демпфуванням. Встановлено, що ефективність ущільнення залежить від узгодження частоти вібрацій з релаксаційними властивостями матеріалу та врахуванням внутрішніх втрат, пов'язаних із пружністю та вологістю заповнювачів. Запропоновано підходи до оптимізації режимів ущільнення з урахуванням структурних та часових параметрів релаксації, що забезпечує підвищення щільності й однорідності готових виробів.

Ключові слова: полістиролбетон; арболіт; вібраційне ущільнення; в'язкопружність; релаксація; модель Кельвіна–Фойгта; модель Максвелла; легкі бетони; демпфування; резонансна частота; динамічне навантаження; масово-пружна система.

Вступ. Легкі бетонні суміші, зокрема полістиролбетон і арболіт, широко використовуються у сучасному будівництві завдяки низькій щільності та високим теплоізоляційним властивостям. Однак їх ущільнення у процесі формування виробів ускладнене через в'язкопружну природу та пористу структуру матеріалу. Тому актуальним є дослідження динамічної поведінки таких сумішей під дією вібраційного навантаження з метою оптимізації технологічних режимів ущільнення.

Аналіз літературних джерел. У наукових дослідженнях [1] значну увагу приділено процесам ущільнення легких бетонів, зокрема полістиролбетону та арболіту. Підкреслюється важливість врахування їх структурних особливостей при динамічному навантаженні, оскільки традиційні методи не гарантують однорідності матеріалу. Дослідження доводять, що мікроструктура таких бетонів змінюється залежно від параметрів вібрації, що визначає якість кінцевого продукту. Окрема увага приділяється впливу резонансних режимів та внутрішнього демпфування на ефективність ущільнення, а також удосконаленню вібраційного обладнання [2, 3].

Мета роботи. Метою дослідження є визначення особливостей динамічної поведінки полістиролбетонних та арболітових сумішей під час вібраційного ущільнення, а також кількісна оцінка впливу релаксаційних властивостей на ефективність ущільнення.

Виклад основного матеріалу.

Полістиролбетонні та арболітові суміші належать до класу в'язкопружних пористих середовищ, що характеризуються складною механічною поведінкою під час динамічного ущільнення. Обидва типи сумішей мають багатокомпонентну структуру: полістиролбетон складається з гранул пінополістиролу, цементно-піщаної матриці та системи повітряних пор, тоді як арболіт містить органічні заповнювачі, зокрема деревну стружку, яка формує пористу волокнисту структуру.

Об'єднуючим фактором для цих матеріалів є прояв релаксаційних властивостей — здатності до поступового зниження напружень після припинення навантаження, що зумовлено як внутрішнім тертям, так і пружністю заповнювачів. У випадку полістиролбетону така поведінка добре

описується диференціальними рівняннями теорії в'язкопружності, оскільки комбінація жорсткої цементної фази та м'якого пінополістиролу створює середовище з амплітудно-залежною жорсткістю. Арболітові суміші, зі свого боку, проявляють виражену здатність до деформацій і затримку відновлення форми через гігроскопічність і пружність органічного заповнювача, що впливає на формування міжчастинкових контактів.

Для моделювання релаксаційних процесів в арболітових сумішах часто використовується модель Кельвіна–Фойгта. Ця модель представляє матеріал як комбінацію пружного елемента (пружина) та в'язкого елемента (демпфер), з'єднаних паралельно. Рівняння моделі має вигляд:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (1)$$

де: $\sigma(t)$ — напруження, $\varepsilon(t)$ — деформація, E — модуль пружності, η — коефіцієнт в'язкості, $d\varepsilon(t)/dt$ — швидкість деформації.

Ця модель дозволяє описати повільне зменшення напружень у часі після припинення навантаження, що є характерним для арболітових сумішей.

При моделюванні процесу ущільнення полістиролбетонної суміші доцільно також застосовувати модель Кельвіна–Фойгта, яка враховує як миттєву пружну реакцію, так і затриману в'язку відповідь. Дослідження показують, що час релаксації для таких сумішей може становити від 0,02 до 0,20 с, залежно від складу та умов ущільнення.

У випадку гармонічного навантаження від вібраційної установки, де зовнішнє навантаження має вигляд:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

суміш реагує з фазовим зсувом, а деформація описується рівнянням:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

де ϕ — фазовий зсув, залежний від співвідношення η/E , ω — частота зовнішнього навантаження.

Для багат шарового середовища (де ущільнювана маса знаходиться у формі), система «вібруюча платформа - полістиролбетон» може бути змодельована як масово-пружна система з демпфуванням:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (4)$$

де: m — маса ущільнюваного шару, c — демпфуючий коефіцієнт (визначає внутрішні втрати в бетоні), k — жорсткість системи (ефективна жорсткість суміші), F_0 — амплітуда зовнішньої сили, $x(t)$ — переміщення (деформація) суміші.

Частота, при якій відбувається резонансне ущільнення, визначається як:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

Ефективне ущільнення досягається, коли частота збудження ω близька до власної частоти системи ω_0 , але при цьому необхідно контролювати величину демпфування, щоб не перевищити критичне затухання. Для цього визначається декремент затухання:

$$\delta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (6)$$

Зі зростанням вмісту пінополістиролу коефіцієнт демпфування зростає через більшу кількість контактних втрат та пружність заповнювача, що вимагає коригування частоти вібраційного впливу.

Для дослідження релаксації після припинення вібрацій можна використовувати рівняння експоненціального спаду деформації:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (7)$$

де $\tau = \eta/E$ — релаксаційний час.

Таким чином, ефективне ущільнення полістиролбетонної суміші передбачає забезпечення частоти вібрацій, що не перевищує релаксаційну здатність матеріалу, а також врахування

демпфувальних властивостей та зниження ймовірності структурного руйнування.

Для опису напружено-деформованого стану арболітової суміші в процесі ущільнення доцільно використовувати модель Максвелла, яка добре описує матеріали з домінуванням в'язких релаксаційних властивостей у початкові моменти навантаження. У цій моделі пружна складова (пружина з модулем E) та в'язка (демпфер з в'язкістю η) з'єднані послідовно:

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma(t)}{dt} + \frac{\sigma(t)}{\eta} \quad (8)$$

Після припинення зовнішнього впливу, наприклад, вібрації чи тиску, спостерігається релаксація напружень, яку описує експоненціальне затухання:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (9)$$

Час релаксації τ залежить від вмісту води, типу заповнювача та попередньої механічної обробки суміші. Час релаксації у вологому стані може перевищувати 0.5 с, що унеможлиблює використання надвисоких частот ущільнення без ризику порушення міжчастинкових зв'язків.

Також, при довготривалому ущільненні суміші з високим вмістом деревини можна спостерігати пластичне накопичення деформації. У цьому випадку використовується узагальнена модель Больцмана–Фогеля, яка враховує розподіл релаксаційних часів:

$$\sigma(t) = \int_0^t G(t-\xi) \cdot \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi \quad (10)$$

$G(t)$ – ядро релаксації, яке залежить від вологості та часу витримки.

При вібраційному ущільненні в реальних умовах процес можна описати за допомогою масово-пружної системи з демпфуванням, як у полістиролбетоні:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (11)$$

але коефіцієнт c буде суттєво більшим унаслідок внутрішнього тертя та капілярних втрат у пористому деревному заповнювачі. Визначення цих параметрів можливе на основі експериментальної кривої релаксації в стандартних умовах ущільнення.

Висновки. Полістиролбетонні та арболітові суміші належать до в'язкопружних пористих середовищ зі складною механічною поведінкою під час динамічного ущільнення, що зумовлює необхідність індивідуального підходу до налаштування вібраційного обладнання. Полістиролбетон, завдяки поєднанню жорсткої цементної матриці та пружного пінополістиролу, демонструє амплітудно-залежну жорсткість і короткий час релаксації, що дозволяє ефективно застосовувати високочастотне ущільнення за умови, що частота не перевищує релаксаційний потенціал матеріалу. Арболітові суміші, навпаки, характеризуються значною здатністю до деформацій, високим коефіцієнтом демпфування та тривалішими релаксаційними процесами, пов'язаними з гігроскопічністю і пружністю деревного заповнювача. Для опису їхньої поведінки доцільно використовувати модель Максвелла або узагальнену модель Больцмана–Фогеля, які враховують накопичення деформацій та розподіл релаксаційних часів.

У процесі вібраційного ущільнення ефективність досягається за умови узгодження частоти збудження з власною частотою масово-пружної системи «форма – суміш» та контролю величини демпфування, з метою уникнення структурного руйнування або нерівномірного ущільнення. Зростання вмісту пінополістиролу чи деревини потребує коригування режиму ущільнення, оскільки посилюються внутрішні втрати енергії. Таким чином, забезпечення оптимальних параметрів ущільнення для кожного типу легкобетонної суміші потребує поєднання експериментального визначення релаксаційних характеристик із точним налаштуванням частоти та тривалості вібраційного впливу.

Список використаних джерел:

1. Nesterenko M.M. (2013) Doslidzhennia rezhymiv ushchilnennia lehkobetonnykh sumishei na udarno-vibratsiinii ustanovtsi metodom matematychnoho planuvannia eksperymentu [Research of compaction modes of lightweight concrete mixtures on a shock-vibration rig using the method of mathematical experimental planning]. *Tekhnika budivnytva - Construction engineering*, №31, 19–24. [in Ukrainian].

- Nazarenko, I. I., Diachenko, O.S. (2019) Eksperymentalni doslidzhennia robochoho protsesu vibratsiinoi ustanovky dlia ushchilnennia betonnykh sumishei zi zminnym rezhymom roboty [Experimental studies of the working process of a vibrating installation for compacting concrete mixtures with a variable operating mode]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny - Mining, Construction, Road and Melioration Machines*, № 92, 24–31. [in Ukrainian]. <http://gbdmm.knuba.edu.ua/article/view/182061>
- Maslov O., Savielov D., Salenko Y., Javadova M. (2022) Theoretical study of the dynamic system «Vibration Platform – Polymer Concrete» stress–strain state. *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations (ICBI 2020) : Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol. 181, 191–201. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85043-2_19

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОГО ВІБРОАБРАЗИВНОГО ПРОЦЕСУ

Дмитро Бугров, аспірант¹ (ORCID: 0009-0000-4571-5147),

Богдан Коробко, професор, д.т.н., професор¹ (ORCID: 0000-0002-9086-3904),

Тетяна Бугрова, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0003-2690-4131),

¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. Наведено отримані експериментальні дані та виконано їх аналіз з метою встановлення енергоефективності комбінованого віброабразивного процесу, що реалізується шляхом одночасної дії вібраційного збурення та обертального руху активного робочого органу. Основну увагу зосереджено на визначенні частки спожитої енергії, яка безпосередньо витрачається на знімання матеріалу з поверхні деталей, та оцінці впливу основних параметрів — амплітуди вібрації, частоти обертання робочої камери та маси середовища на енергетичну ефективність процесу. Проведено заміри потужності споживання як приводу вібростолу так і приводу роторної робочої камери при зміні режимів їх роботи. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції аналогічного обладнання та визначення їх оптимальних режимів роботи.

Ключові слова: віброабразивна обробка; комбінований спосіб; вібропривод; роторна робоча камера; показник енергоефективності; знімання матеріалу

Вступ. Сучасні технології обробки поверхонь вимагають не лише високої якості кінцевого результату, а й ефективного використання енергетичних ресурсів. У контексті загального тренду на енергоощадне виробництво особливої актуальності набуває аналіз енергоефективності технологічних процесів, зокрема віброабразивної обробки, яка широко використовується для фінішного полірування, заокруглення кромки, зняття задирок тощо.

Традиційні віброустановки, незважаючи на свою універсальність, характеризуються незначною ефективністю використання загальної енергії системи для виконання корисної роботи. Це зумовлює необхідність пошуку нових технологічних рішень, які дозволили б покращити використання енергії в зоні обробки.

Аналіз літературних джерел. У роботах [1] зазначено, що механізм знімання матеріалу під час віброобробки зумовлений багаторазовими ударами, ковзанням та тертям частинок абразиву по поверхні деталі, однак лише незначна частка енергії приводів безпосередньо бере участь у формуванні контактної взаємодії.

Окрім дослідження фокусуються на вивченні енергетики віброобробки з позицій математичного моделювання. Зокрема, роботи [2] заклали основи дискретного елементного моделювання (DEM), що дозволяє детально описати мікрвзаємодію частинок. Подальший розвиток отримали моделі з урахуванням ефективною контактної сили, що визначається як результат пружного деформування та тертя при динамічному зіткненні тіл [3].

Водночас у проаналізованих джерелах практично відсутній системний підхід до оцінки енергоефективності такого комбінованого процесу, зокрема у вигляді кількісного аналізу енергоспоживання окремих приводів та їх зв'язку з вихідними параметрами обробки. Більшість моделей зосереджуються на кінематичних і контактних характеристиках без урахування фактичного споживання потужності приводами віброплатформи та обертальною камерою.

Мета роботи. Метою даного дослідження є оцінка та кількісний аналіз енергоефективності комбінованого віброабразивного процесу, який реалізується шляхом поєднання вібраційного