

УДК 692.23

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.69.1008

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРИЙОМІВ ЗАСТОСУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

КОЛОХОВ В. В., канд. техн. наук, доц.

Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 362-26-94, e-mail: kolokhov.viktor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

Анотація. Нормовані та проектні параметри бетону відрізняються від реальних значень, які отримує бетон конструкції під час будівництва. Використання приладів неруйнівного контролю потребує їх тарування, яке здійснюється переважно лише за результатами визначення фізико-механічних характеристик бетону зразків кубічної форми. Але, оскільки умови формування та твердіння бетону у зразках та конструкції різні, чинні методики не достатньо адекватно відображають властивості бетону конструкції. Досвід використання ультразвукових приладів та власні дослідження з метою удосконалення ультразвукового методу дозволили рекомендувати обмежити область застосування цього методу періодичним контролем, оскільки таким чином достатньо легко та точно можна відстежувати відносні зміни в матеріалі конструкції. Але для оцінки технічного стану конструкцій необхідні не лише відносні, а й абсолютні значення фізико-механічних характеристик матеріалу конструкції. Такі дані, за попередніми міркуваннями, з належною достовірністю можна отримати лише застосовуючи механічні методи неруйнівного контролю. **Мета роботи** – визначення напрямку вдосконалення методики застосування механічних методів неруйнівного контролю. **Виклад матеріалу.** Розглянуто можливість прямого визначення модуля пружності під час взаємодії індентора з напівнескінченим простором, що має пружно-пластичні властивості. Виділено чотири стадії взаємодії залежно від характеру сил, які забезпечують рух індентора, а також виду і кількості елементів системи, що беруть участь у взаємодії в ній. Створено рівняння збереження кількості руху в системі та проведено аналіз цих рівнянь та результатів їх розв'язання. **Висновки.** Аналіз проведених досліджень показує, що отримати рішення відносно необхідних показників за прийнятних витрат досить складно. При цьому надійність отриманих результатів невисока. Для розкриття отриманої невизначеності виникає потреба введення в систему додаткових рівнянь, які можна створити на підставі додаткових вимірювань. Таким чином, удосконалення методики визначення властивостей матеріалів потребує модифікації системи рівнянь та проведення додаткових вимірів із наступними розрахунками.

Ключові слова: бетон; фізико-механічні характеристики; неруйнівні методи контролю

IMPROVEMENT OF METHODS OF APPLICATION OF MECHANICAL METHODS OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL

KOLOKHOV V.V., Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-76, e-mail: kolokhov.viktor@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

Abstract. Problem statement. Standardized and design parameters of concrete usually differ from the actual values obtained by the concrete of a structure during construction. The use of non-destructive testing devices usually requires their calibration, which is carried out by the vast majority only based on the results of determining the physical and mechanical characteristics of concrete of cubic samples. However, since the conditions of concrete formation and curing in the samples and the structure differ, the existing methods do not adequately reflect the properties of the concrete in the structure. Experience in the use of ultrasonic devices and personal research to improve the ultrasonic method allowed us to recommend limiting the scope of this method to periodic monitoring, since this method can easily and accurately track relative changes in the material of the structure. However, to assess the technical condition of structures, not only relative but also absolute values of the PhMC of the structure material are required. Such data, according to preliminary considerations, can be obtained with proper reliability only by using mechanical methods of non-destructive testing. **The purpose of the article** is determination of the way to improve the methodology for application of mechanical non-destructive testing methods. **Results.** The possibility of direct determination of the elastic modulus during the interaction of an indenter with a semi-infinite space with elastic-plastic properties is considered.

Four stages of interaction are distinguished, depending on the nature of the forces that provide the indenter's motion, as well as the type and number of system elements involved in the interaction. The equations of conservation of the amount of motion in the system are created and the results of their solution are analyzed. **Conclusions.** The analysis of the conducted studies shows that it is quite difficult to obtain a solution with the necessary indicators at acceptable costs. At the same time, the reliability of the results obtained is low. To reveal the resulting uncertainty, it is necessary to introduce additional equations into the system, which can be created on the basis of additional measurements. Thus, improvement of the methodology for determining the properties of materials requires modification of the system of equations and additional measurements with subsequent calculations.

Keywords: concrete; physical and mechanical characteristics; non-destructive testing methods

Вступ. Мету значної кількості експертних робіт у будівництві становить визначення технічного стану будівель і споруд. Такі роботи проводяться у вигляді обстеження, однією зі складових якого є визначення фізико-механічних характеристик (ФМХ) бетону конструкцій. Для проведення обстеження зазвичай використовують прилади неруйнівного контролю (НК), а результати, отримані за їх допомогою, порівнюють із нормованими та проектними параметрами. Чинними нормами передбачено наведення параметрів бетону в табличній формі [1] або їх візуалізація діаграмою «напруження – деформації» (« $\sigma - \varepsilon$ ») (рис. 1).

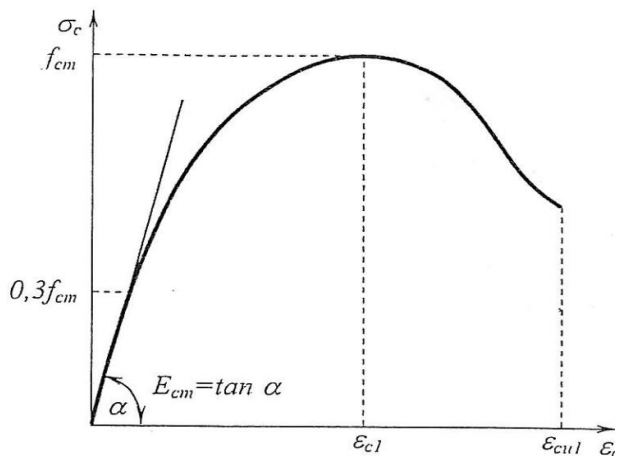


Рис. 1. Діаграма (« $\sigma - \varepsilon$ ») за ДБН В.2.6-98:2009 [1]

Прилади НК зазвичай здатні визначати лише значення f_{cm} , або f_{ck} , оскільки тарування роботи приладу здійснюється переважно лише за результатами визначення ФМХ бетону зразків кубічної форми.

Як було показано в попередніх працях [2–5], визначення ФМХ бетону за результатами лабораторних випробувань кубів не зовсім адекватно відображають ФМХ бетону конструкції, оскільки умови

формування та твердіння бетону у зразках та конструкції відрізняються.

Під час проведення визначення міцності бетону механічними методами (НК) [6] зразок (або конструкція) зазнає локального деформування, величина якого залежить від ФМХ матеріалу конструкції та параметрів взаємодії в системі «прилад – бетон». Виконавши певні вимірювання деформацій та співставивши їх із параметрами взаємодії в системі «прилад – бетон» за нормованою методикою, отримують (за допомогою наперед установлених тарувальних залежностей) міцнісні параметри бетону.

При цьому початкові параметри силового впливу на бетонну поверхню зразка здебільшого фіксовані (вплив дослідника практично знівельовано), а сама взаємодія приладу зі зразком (або конструкцією) відбувається у нестационарному режимі, який зазвичай буде відмінним від режиму випробувань під час установлення тарувальних залежностей, що суттєво впливає на точність отриманих результатів.

Але такий метод істотно найбільш наближений за сенсом до нормованих методів [6–9]. Навпаки, під час визначення міцності бетону ультразвуковим методом [10] вимірювання проводяться у стаціонарному режимі, але вплив дослідника за існуючою методикою дуже великий, що суттєво впливає на точність визначення міцності.

Досвід використання ультразвукових приладів [11; 12] та власні дослідження з метою удосконалення ультразвукового методу [13–15] дозволили рекомендувати обмежити область застосування цього методу періодичним контролем, оскільки таким методом достатньо легко та точно можна відстежувати відносні зміни в матеріалі конструкції. Але для оцінки

технічного стану конструкцій необхідні не лише відносні, а й абсолютні значення ФМХ матеріалу конструкції. Такі дані, за попередніми міркуваннями, з належною достовірністю можна отримати лише за допомогою механічних методів НК, що зазвичай застосовують непряму характеристику взаємодії «прилад – бетон» для визначення значення f_{cm} . Згідно з визначеним значенням f_{cm} обирається клас бетону, за яким визначається E_{cm} (за таблицею 3.1 [1]).

Мета роботи – визначення напрямку вдосконалення методики застосування механічних методів НК.

Результати досліджень. Робота більшості існуючих приладів НК міцності бетону ґрунтується на зануренні сферичного індентора в поверхню бетону. Мета такого занурення – визначення властивостей матеріалу, а завдання зводиться до визначення параметрів системи типу «чорна скринька», якою служить матеріал певної конструкції.

Розглянемо можливість прямого визначення E_{cm} під час взаємодії індентора («І») з напівнескінченим простором («П»), що має пружно-пластичні властивості. Для здійснення взаємодії в системі «І» необхідно надати деяку кількість енергії, яку він витратить за взаємодії з «П». Принципово все одно, який вид енергії запасастся «І», оскільки перед взаємодією має значення тільки кінетична енергія W_k . У процесі взаємодії «І» витрачає накопичену енергію на: пружну (робота A_{np}) і пластичну (робота A_{nl}) деформацію матеріалу «П», подолання сил тертя при ударі (робота $A_{(m\ yd)}$) і в приладі (робота $A_{(m\ np)}$), диспергування і

збільшення вільної поверхні матеріалу (робота $A_{внм}$), а також на подолання опору повітря (робота $A_{(o\ пов)}$). Інші впливи на процес взаємодії приладу з поверхнею бетону незначні і можуть не розглядатися при проведенні вимірів.

Величину роботи, здійснюваної «І» при ударі, визначимо як:

$$A_I = A_{np} + A_{nl} + A_{(m\ yd)} + A_{(m\ np)} + A_{внм} + A_{(o\ пов)}. \quad (1)$$

Втрата енергії «І» при ударі ΔW_k визначиться різницею кінетичних енергій індентора до і після удару, тобто $\Delta W_k = 0,5 m(V_0^2 - V_k^2)$, де: V_0 і V_k швидкості «І» до і після удару.

Апріорі приймається, що пристрій додає «І» кінетичну енергію ΔW_k , величина якої постійна цього приладу. При цьому стандартом регламентується необхідність проведення тарування приладів (тих, що здійснюють виміри), пов'язана зі зміною властивостей пристрою, що задає початковий імпульс взаємодії в системі. Проте пристрій задає «І» ΔW_k на деякій відстані від «П», що власне і дозволяє виділити усі процеси, що відбуваються, в окрему стадію. Під час надання енергії «І» пристрій вимушений виконати роботи $A_{(m\ np)}$ та $A_{(o\ пов)}$, що повинно позначитися на величині енергії, яку передає «І». При цьому кожен з цих доданків (1) впливає на точність визначення.

Аналіз наведеного вище дозволяє виділити чотири стадії взаємодії залежно від характеру сил, що забезпечують рух «І», а також виду і кількості елементів системи, що беруть участь у взаємодії в ній. Межі етапів за взаємодії «І» з «П» показані на рисунку 2.

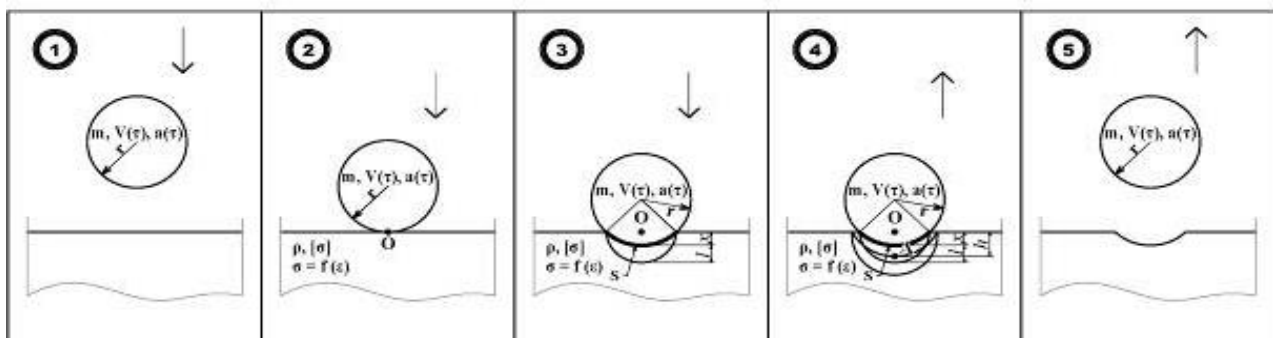


Рис. 2. Схема. Межі етапів за взаємодії «І» з «П»: 1 – початок руху «І»; 2 – дотик «І» та «П»; 3 – крайнє положення занурення «І» в «П»; 4 – кінець контакту «І» з «П»; 5 – вільне переміщення «І»

На попередній стадії у взаємодії бере участь «І» і деякий пристрій, що задає «І» запас кінетичної енергії, необхідний для здійснення процесу занурення в «П». Тривалість стадії визначається як час від початку руху «І» до моменту точкового контакту «І» з «П».

На другому етапі рух у системі ініційовано дією зовнішньої сили. Межі цього етапу визначимо як час від початку контакту «І» з «П» до моменту найбільшого проникнення «І» в «П». Тоді вираз (1) на цьому етапі матиме вигляд:

$$A_I = A_{np} + A_{nl} + A_{(m\ np)} + A_{внм}. \quad (2)$$

Для подальшого розгляду прийемо також, що до моменту початку контакту з «П» дія пристрою на «І» припинена (що характерно для усіх нині існуючих способів визначення властивостей матеріалу конструкції), тобто на цьому етапі пристрій можна виключити із системи взаємодії. Оскільки спосіб надання «І» необхідної для процесу занурення енергії істотно не впливає на характер і параметри процесу проникнення в «П», то на цій стадії прийемо такі допущення:

- «І» масою m розпочало рух із певної відстані від поверхні «П»;
- до моменту початку контакту (рис. 3.) «І» отримує: швидкість V_0 ; кінетичну енергію $W_k = 0,5mV_0^2$ та імпульс $p = mV_0$.

Подальший рух «І» відбувається за дії сили $F = m a$, де $a = f(\tau)$ – прискорення, з яким відбувається занурення тіла в «П» (рис. 3).

Умовимося під системою в даному випадку розуміти «І» і залучений у процесі взаємодії деякий об'єм напівпростору з щільністю ρ_0 . Під ρ_0 розумітимемо щільність матеріалу недеформованої структури.

Взаємодія «І» і «П» відбувається за дії сили F , величина якої визначатиме, разом із властивостями «П», характер взаємодії в системі. Під час занурення «І» в «П» (рис. 4), на межі контакту виникає напруга (тиск), що дорівнює:

$$\sigma = F/S, \quad (3)$$

де σ – напруга [Па], S – площа, на якій діє сила, m^2 .

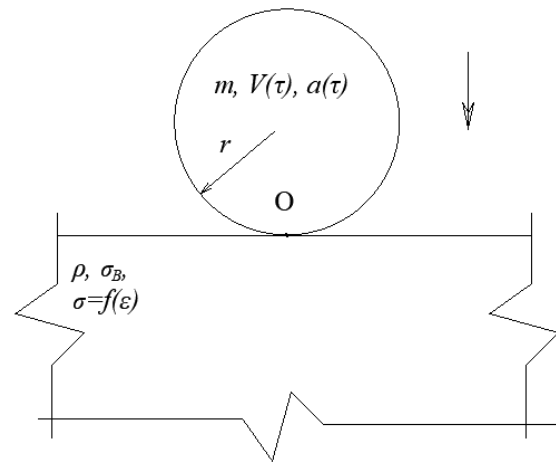


Рис. 3. Схема дотику «І» до «П»: $m, V(\tau), a(\tau)$ – параметри руху «І» відповідно маса, швидкість (залежно від часу) та прискорення (залежно від часу); ρ, σ_B та $\sigma = f(\varepsilon)$ – параметри (властивості) «П» відповідно щільність, межа міцності та залежність напруги від деформації

У процесі занурення «І» в «П» напруга в «П» змінюється по глибині області занурення. При цьому напруга σ змінюється від межі міцності (σ_B) біля зони контакту до нуля на відстані l від зони контакту, а глибина елементарної області змінюється за дії сили F на величину Δl , що характеризує пружні властивості матеріалу «П» і дорівнює:

$$\Delta l = \varepsilon l, \quad (4)$$

де $\varepsilon = \sigma/E$ відносна деформація; E – модуль деформації матеріалу «П» [Па].

Складемо рівняння збереження кількості руху в системі. Для цього виділимо область у зоні контакту «І» – «П» обмежену поверхнею зони контакту «І» – «П» і таку, що поширюється углиб «П» на відстань $l(\tau)$. Величина $l(\tau)$ визначається як глибина зони впливу діючої на площу $S(\tau)$ сили $F(\tau)$, що створює на цій площі тиск $\sigma(\tau)$.

Схематично зона контакту наведена на рисунку 5.

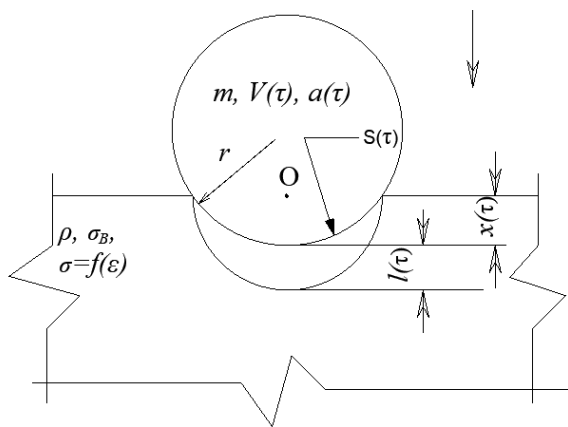


Рис. 4. Схема руху «I» за дії зовнішньої сили: $m, V(t), a(t)$ – параметри руху «I» відповідно маса, швидкість (залежно від часу) та прискорення (залежно від часу); ρ, σ_B та $\sigma = f(\epsilon)$ – параметри (властивості) «II» відповідно щільність, межа міцності та залежність напруги від деформації; $S(t), r, x(t), l(t)$ – геометричні параметри взаємодії «I» з «II» (залежно від часу) відповідно площа зони контакту, радіус індентора, глибина проникнення «I» в «II» та глибина зони впливу «I» на «II»

Матеріал у зоні контакту деформується за дії сили $F(t)$ до тих пір, поки напруга $\sigma(t)$ не набуває значення $\sigma = \sigma_B$. За таким рівнем напруги в матеріалі відбувається руйнування структури, а щільність матеріалу підвищується до граничного значення за рахунок зникнення пор у матеріалі. Тобто утворюється деякий прошарок, що більше не деформується, а переміщується спільно з «I». Подальша деформація в системі викликає збільшення розміру такого прошарку, що супроводжується збільшенням його маси та вносить подальші зміни в характер взаємодії елементів системи.

За межею області граничного ущільнення матеріалу напруги в матеріалі не перевищують рівня $\sigma = \sigma_B$, а деформація матеріалу супроводжується зміною його щільності на величину, яку характеризує модуль деформації матеріалу E . У кожен момент часу рівняння щільності в зоні деформації можна записати у вигляді:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \sigma_t / E). \quad (5)$$

Необхідно також урахувати, що різні частини області, яка деформується, рухаються з різними швидкостями. Так, у показаних на рисунку 5 областях «II» швидкості руху матеріалу дорівнюють:

- в області вище за поверхню «KA₀K» матеріал «II» відсутній (зруйнований), зруйновані фрагменти втиснуті в область, що пролягає нижче;
- в області, обмеженій поверхнею «A₀KA₃KA₀», структура матеріалу зруйнована, а матеріал цієї області рухається із швидкістю V_{31} , яка дорівнює швидкості «I»;
- в області, обмеженій поверхнею «A₃KA₂KA₃» структура матеріалу схильна до пластичних деформацій, а матеріал цієї області рухається зі швидкістю V_{32} , яка може бути представлена функцією $V_{32} = f(t, l, \rho, (\sigma - \epsilon), E, S)$;
- в області, обмеженій поверхнею «A₁KA₂KA₁» структура матеріалу працює пружно, а матеріал цієї області рухається зі швидкістю V_{21} , яка може бути представлена функцією $V_{21} = f(t, l, \rho, E, S)$;
- в області нижче поверхні «KA₁K» структура матеріалу не зазнає деформацій за дії «I», матеріал цієї області нерухомий.

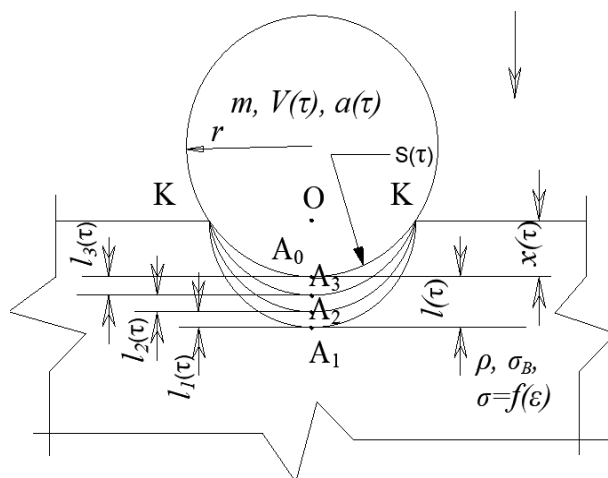


Рис. 5. Схема зони контакту: $S(t), r, x, l(t), l_1(t), l_2(t), l_3(t)$ – геометричні параметри взаємодії «I» з «II», відповідно площа зони контакту, радіус індентора, глибина проникнення «I» в «II», глибина зони впливу «I» на «II», товщина зони повних руйнувань ($A_0KA_3KA_0$), товщина зони пружно-пластичної роботи матеріалу ($A_3KA_2KA_3$) та товщина зони пружної роботи матеріалу ($A_1KA_2KA_1$)

Зміну маси для кожного шару можна записати таким чином:

$$\Delta m_{03(\tau)} = S_{03(\tau)} \Delta l_{03(\tau)} \rho_{03(\tau)},$$

$$\Delta m_{32(\tau)} = S_{32(\tau)} \Delta l_{32(\tau)} \rho_{32(\tau)},$$

$$\Delta m_{21(\tau)} = S_{21(\tau)} \Delta l_{21(\tau)} \rho_{21(\tau)}.$$

Оскільки σ , S та a залежать від глибини x проникнення (при цьому максимальна величина проникнення h «І» в «П», для складання рівнянь необхідно записати:

$$\int_0^h F dx = \int_0^h m \cdot a_{x(x)} dx, \quad (6)$$

$$\int_0^h F dx = \sigma \int_0^h S_{x(x)} dx. \quad (7)$$

Рух під час взаємодії «І» – «П» від моменту початку дотику в точці O до моменту його повної зупинки в точці A_0 відбувається за час τ_1 . Рівняння руху можна записати як:

$$x = V_{1n} + a_1(\tau). \quad (8)$$

Робота A_I «І» за взаємодії «І» – «П» від моменту початку дотику в точці O до моменту його повної зупинки в точці A можна записати як:

$$A_{I\tau_1} = \int_0^h m \cdot a_{x(x)} x dx. \quad (9)$$

Прийmemo що:

$$A_{пр} = \int_0^h E \cdot \varepsilon_l \cdot S_{x(x)} l_x dx, \quad (10)$$

$$A_{пл} + A_{(туд)} + A_{впм} = \int_0^h E \cdot S_{x(x)} x dx. \quad (11)$$

Тоді роботу внутрішніх сил $A_{П\tau_1}$ запишемо як:

$$A_{П\tau_1} = \int_0^h E \cdot \varepsilon_l \cdot S_{x(x)} l_x dx + \int_0^h \sigma \cdot S_{x(x)} x dx. \quad (12)$$

З урахуванням $\sigma_l = E \varepsilon_l$ (12) запишемо як:

$$A_{П\tau_1} = \int_0^h \sigma_l \cdot S_{x(x)} l_x dx + \int_0^h \sigma \cdot S_{x(x)} x dx. \quad (13)$$

Прирівняємо (9) до (13):

$$\int_0^h m a_{x(x)} x dx = \int_0^h \sigma_l S_{x(x)} l_x dx + \int_0^h \sigma S_{x(x)} x dx. \quad (14)$$

Перетворимо (14) з урахуванням (8), щоб охарактеризувати процес під час руху «І» від точки «О» до точки «А» (рис. 6):

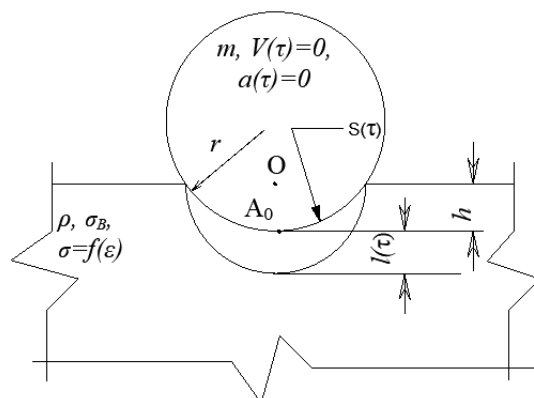


Рис. 6. Крайнє положення занурення (межа етапів): $m, V(\tau), a(\tau)$ – параметри руху «І» відповідно маса, швидкість ($= 0$) та прискорення ($= 0$); ρ, σ_B та $\sigma = f(\varepsilon)$ – параметри (властивості) «П» відповідно щільність, межа міцності та залежність напруги від деформації; $S(\tau), r, h, l(\tau)$ – геометричні параметри взаємодії «І» з «П» відповідно площа зони контакту, радіус індентора, гранична глибина проникнення «І» в «П» та глибина зони впливу «І» на «П»

$$\begin{aligned} & \int_0^{\tau_1} m \cdot a_{1(\tau)} (V_{1n} + a_{1(\tau)} \cdot \tau) a_{1(\tau)} d\tau = \\ & = \int_0^{\tau_1} \sigma_d \cdot S_{\tau(\tau)} l_{\tau} a_{1(\tau)} d\tau + \\ & + \int_0^{\tau_1} \sigma \cdot S_{\tau(\tau)} (V_{1n} + a_{1(\tau)} \cdot \tau) a_{1(\tau)} d\tau. \quad (15) \end{aligned}$$

У цьому рівнянні декілька невідомих:

τ_1 – час руху «І» від початку контакту з «П» до найбільш глибокого проникнення «І» в «П»;

$a_1(\tau)$ – зміна прискорення «І» залежно від часу контакту;

S – площа поверхні контакту залежно від часу контакту;

σ – напруга на межі зони контакту;

σ_l – зміна напруги в зоні впливу контактного тиску $\sigma = f(l)$;

l – розмір елементарної області простору, на який поширюється вплив збурення під час контакту.

Якщо перші два параметри можуть бути виміряні безпосередньо в процесі взаємодії, інші не детермінуються за прийнятних апаратних витрат.

Тіло «І», занурившись у «П» на глибину h (точка A_0 на рис. 6), витратило усю

кінетичну енергію і припинило рух усередину «П».

Кінетична енергія, отримана «І» на початку руху, частково витрачена на руйнування та пластичну деформацію «П» шару $l_{nl} = l_2 + l_3$ (рис. 5), та частково перетворилася на енергію пружної деформації шару «П» глибиною $l_{np} = l_1 + l_2$ (рис. 5) на поверхні якого зовнішній тиск став рівним $\sigma = 0$, що спричинює «розвантаження» пружної деформації і ініціює початок руху «І» в протилежному напрямі з прискоренням $a_2(\tau)$.

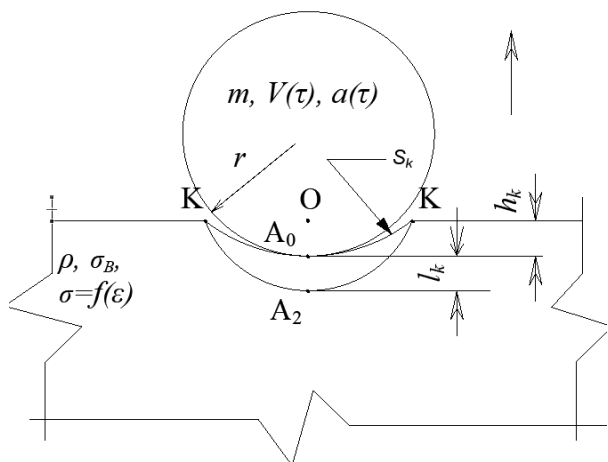


Рис. 7. Рух у процесі відскоку. Кінець контакту. $m, V(\tau), a(\tau)$ – параметри руху «І» відповідно маса, швидкість (залежно від часу) та прискорення (залежно від часу); ρ, σ_B та $\sigma = f(\epsilon)$ – параметри (властивості) «П» відповідно щільність, межа міцності та залежність напруги від деформації; S_k, r, h_k, l_k – геометричні параметри взаємодії «І» з «П» відповідно гранична площа зони контакту, радіус індентора, гранична глибина проникнення «І» в «П» та гранична глибина зони впливу «І» на «П»; кінцева зона повних руйнувань та пластичних деформацій ($A_0KA_2KA_0$)

На наступному етапі рух у системі «І» – «П» ініційовано дією внутрішніх сил. Початкове положення «І» на цьому етапі – крайнє положення занурення (рис. 6).

Рух «І» за взаємодії «І» – «П», ініційований дією внутрішніх сил від моменту його повної зупинки в точці А до моменту закінчення дотику (рис. 7) відбувається за час $\tau = \tau_2 - \tau_1$.

Рівняння руху можна записати у вигляді

$$X = a_2(\tau) \tau. \quad (16)$$

Застосовуючи допущення, аналогічні прийнятим вище, і провівши аналогічні перетворення, отримуємо рівняння, що характеризують рух у системі в процесі відскоку:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} m (a_2(\tau))^3 \tau d\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sigma_d S_\tau l a_2(\tau) d\tau. \quad (17)$$

Оскільки процес руху під час взаємодії «І» – «П» неперервний, рівняння (15) і (17) можна поєднати у систему:

$$\begin{cases} \int_0^{\tau_1} m a_1(\tau) (V_{1n} + a_1(\tau)\tau) a_1(\tau) d\tau = \\ = \int_0^{\tau_1} \sigma_l S_\tau(\tau) l_\tau a_1(\tau) d\tau + \\ + \int_0^{\tau_1} \sigma S_\tau(\tau) (V_{1n} + a_1(\tau)\tau) a_1(\tau) d\tau \\ \int_{\tau_1}^{\tau_2} m (a_2(\tau))^3 \tau d\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sigma_l S_\tau l a_2(\tau) d\tau \end{cases} \quad (18)$$

Висновки

Аналіз цієї системи рівнянь показує, що отримати розв'язок відносно необхідних показників за прийнятних витрат досить складно. При цьому надійність отриманих результатів невисока. Для розкриття отриманої невизначеності виникає потреба введення в систему додаткових рівнянь, які можна створити на підставі додаткових вимірювань.

Таким чином, удосконалення методики визначення властивостей матеріалів потребує модифікації системи рівнянь та проведення додаткових вимірів із наступними розрахунками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В. 2.6-98:2009. [На заміну СніП 2.03.01-84*]; чинні від 2011.06.01. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 75 с. (Державні будівельні норми України.)
2. Колохов В. В. Некоторые аспекты применения методов неразрушающего контроля свойств бетона. *Theoretical Foundations of Civil Engineering : Polish-Ukrainian Transactions (conference)*. Варшава, 2012. Вып. 20. С. 443–448.

3. Kolokhov V., Savytskyi M., Sopilniak A., Gasii G. Book Chapter. Time Measurement of Ultrasonic Vibrations Extension in Concrete of Different Compositions. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol 73. Pp. 95–102. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3_11
4. Kolokhov V., Sopilniak A., Gasii G., Kolokhov A. Structure material physic-mechanical characteristics accuracy determination while changing the level of stresses in the structure. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7 (4.8). Pp. 74–78. URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27217>
5. Kolokhov Victor, Savytskyi Mykola, Sopilniak Artem. Stress-strain state of the local area in the building element with structural defect. *Journal of Engineering Science*. Vol. XXVIII, № 1. Technical University of Moldova, 2021. Pp. 111–116. URL: https://jes.utm.md/wp-content/uploads/sites/20/2021/04/JES-1-2021_111-116.pdf
6. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. ДСТУ б В. 2.7-220:2009. [Введене вперше (зі скасуванням ГОСТ 22690-88); чинний з 2010-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 20 с. (Національний стандарт України).
7. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона : ДСТУ б В. 2.7-217:2009. [Відведено вперше (зі скасуванням ГОСТ 24452-80); чинний з 2010-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 16 с. (Національний стандарт України).
8. Будівельні матеріали. Бетони. Правила контролю міцності : ДСТУ б В. 2.7-224:2009. [Введене вперше (зі скасуванням ГОСТ 18105-86); чинний з 2010-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 23 с. (Національний стандарт України).
9. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій: ДСТУ б В. 2.7-223:2009. [Введене вперше (зі скасуванням ГОСТ 22690-88); чинний з 2010-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 12 с. (Національний стандарт України).
10. Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності : ДСТУ б В. 2.7-226:2009. [Введене вперше (зі скасуванням ГОСТ 17624-87); чинний з 2010-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 27 с. (Національний стандарт України).
11. Schabowicz K. Ultrasonic tomography – The latest nondestructive technique for testing concrete members – Description, test methodology, application example. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2014. Vol. 14, iss. 2. Pp. 295–303.
12. Chen Jun, Zheng Xu, Yue Yu, Yangping Yao. Experimental characterization of granite damage using nonlinear ultrasonic techniques. NTD and E International. Editor-in-chief D. E. Chimenti. 2014. Vol. 67. Pp. 10–16.
13. Колохов В. В., Колохов О. В. Зміна часу поширення ультразвукових коливань у бетоні за зміни умов проведення вимірювань. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 2. С. 95–104.
14. Колохов В. В., Колохов О. В. Деякі аспекти вимірювання часу поширення ультразвукових коливань у бетоні. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 3. С. 58–65.
15. Колохов В. В., Кожанов Ю. О., Зезюков Д. М. Вплив рівня напруги на швидкість розповсюдження ультразвукових коливань у бетоні конструкцій. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 1. С. 49–57.

REFERENCES

1. DBN V. 2.6-98:2009. *Konstrukciyi budinkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstrukciyi. Osnovni polozhennya*. [DBN V. 2.6-98:2009. Structures of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures. Main provisions]. To replace SnyP 2.03.01-84*; valid from 2011.06.01. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009, 75 p. (State Building Regulations of Ukraine.) (in Ukrainian).
2. Kolokhov V.V. *Nekotorye aspekty primeneniya metodov nerazrushayushego kontrolya svojstv betona* [Some aspects of the application of methods of non-destructive testing of concrete properties]. Theoretical Foundations of Civil Engineering : Polish-Ukrainian Transactions (conference). Vol. 20, Warsaw, 2012, pp. 443–448. (in Russian).
3. Kolokhov V., Savytskyi M., Sopilniak A. and Gasii G. Book Chapter. Time Measurement of Ultrasonic Vibrations Extension in Concrete of Different Compositions *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, vol. 73, pp. 95–102. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3_11.
4. Kolokhov V., Sopilniak A., Gasii G. and Kolokhov A. Structure material physic-mechanical characteristics accuracy determination while changing the level of stresses in the structure. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018, vol. 7 (4.8), pp. 74–78. URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27217>.
5. Stress-strain state of the local area in the building element with structural defect. Victor KOLOKHOV, Mykola SAVYTSKYI, Artem SOPILNIAK *Journal of Engineering Science*. Vol. XXVIII, no. 1, Technical University of Moldova, 2021, pp. 111–116. URL: https://jes.utm.md/wp-content/uploads/sites/20/2021/04/JES-1-2021_111-116.pdf.
6. *DSTU B V.2.7-220:2009. Betony. Vyznachennya mitsnosti mekhanichnymy metodamy neruynivnoho kontrolyu* [DSTU b V. 2.7-220:2009. Building materials. Concretes. Determination of strength by mechanical methods of non-destructive testing]. Introduced for the first time (with cancellation of GOST 22690-88); effective from 2010-09-01. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010, 20 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).

7. *DSTU b V. 2.7-217:2009. Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya pryzmovoyi mitsnosti, modulya pruzhnosti i koefitsiyenta Puassona* [DSTU b B. 2.7-217: 2009. Building materials. Concrete. Methods for determining the prism strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio]. Allocated for the first time (with the abolition of GOST 24452-80); valid from 2010-09-01]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010, 16 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
8. *DSTU B V. 2.7-224:2009. Budivel'ni materialy. Betony pravyla kontrolyu mitsnosti* [DSTU b B. 2.7-224: 2009. Building materials. Concrete strength control rules]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010, 23 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
9. *DSTU b V. 2.7-223:2009. Budivel'ni materialy. Betony metody vyznachennya mitsnosti za zrazkamy, vidibrany z konstruktsiy* [DSTU b B. 2.7-223:2009. Building materials. Concrete methods for determining the strength of samples taken from structures]. Introduced for the first time (with the abolition of GOST 22690-88); valid from 2010-09-01. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010, 12 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
10. *DSTU B V.2.7-226:2009. Betony. Ul'trazvukovyy metod vyznachennya mitsnosti* [DSTU B B.2.7-226:2009. Concrete. Ultrasonic method for determining the strength]. Effective from 2010-09-01. Kyiv : SE Ukrakbudinform, 2010, 27 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
11. Schabowicz K. Ultrasonic tomography – The latest nondestructive technique for testing concrete members – Description, test methodology, application example. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014, vol. 14, iss. 2, pp. 295–303.
12. Chen Jun, Zheng Xu, Yue Yu and Yangping Yao. Experimental characterization of granite damage using nonlinear ultrasonic techniques. NTD and E International. Editor-in-chief D.E. Chimenti. 2014, vol. 67, pp. 10–16.
13. Kolokhov V.V. and Kolokhov O.V. *Zmina chasu poshyrennya ul'trazvukovykh kolyvan' u betoni za zminy umov provedennya vymiryuvan'* [Change of propagation time of ultrasonic oscillations in concrete with changes in measurement conditions]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2019, no. 2, pp. 95–104. (in Ukrainian).
14. Kolokhov V.V. and Kolokhov O.V. *Deyaki aspekty vymiryuvannya chasu poshyrennya ul'trazvukovykh kolyvan' u betoni* [Some aspects of measuring the propagation time of ultrasonic vibrations in concrete]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2019, no. 3, pp. 58–65. (in Ukrainian).
15. Kolokhov V.V., Kozhanov Yy.O. and Zeziukov D.M. *Vplyv rivnya napruhy na shvydkist' rozpovsyudzhennya ul'trazvukovykh kolyvan' u betoni konstruktsiy* [Influence of stress level in concrete constructions at ultrasound speed]. *Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2019, no. 1 (249–250), pp. 49–57. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.10.2023.