

Методика й приладове забезпечення для дослідження міцності з'єднань бетону в клейових конструкціях при впливі експлуатаційних і технологічних факторів ультразвуковим імпульсним методом

Я.О. Серіков, Л.А. Назаренко

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна
s0509088828@gmail.com

Анотація

Ефективною технологією при ремонті є клейові з'єднання бетону. Для з'єднань використовують полімерні клеї – епоксидні, силосанові, акрилові та ін. Така технологія зменшує витрати матеріалів і терміни будівельних робіт. Опубліковані дані свідчать, що ефективним є застосування акрилових клеїв. При такому з'єднанні бетону основним завданням є забезпечення потрібної міцності клейової конструкції. Аналіз публікацій виявив, що на її міцність переважно впливають: зовнішнє навантаження; міцність склеюваних бетонів; площа склеювання; товщина шару клею. Наразі дослідження впливу цих факторів проводять на зразках конструкцій на пресовому обладнанні, вимірюючи їхню міцність. При цьому неможливо визначити значення граничного зовнішнього навантаження, яке викликає мікротріщини, тобто призводить до зниження міцності конструкції. В результаті це може викликати похибку у висновках, що призведе до зниження надійності експлуатації будівельного об'єкта. Така методика також унеможливає контроль стану клейових конструкцій, що застосовані на реальних будівельних об'єктах. Розроблена методика досліджень ультразвуковим імпульсним методом базується на залежності швидкості поширення, коефіцієнта загасання ультразвукових коливань від відносної зміни структури досліджуваного матеріалу. Представлені методика й апаратура для її реалізації дозволяють визначати величину максимального зовнішнього навантаження на клейову конструкцію й забезпечити контроль її стану за процесом тріщиноутворення.

Ключові слова: бетон; клейові конструкції; навантаження; міцність; ультразвуковий імпульсний метод.

Отримано: 30.01.2023

Відредаговано: 02.03.2023

Схвалено до друку: 09.03.2023

Вступ

При проведенні відновлювальних, ремонтних, реставраційних робіт, запровадженні заходів із подовження життєвого терміну будівельних об'єктів ефективним напрямком є застосування клейових з'єднань бетону в конструкціях. Для такого з'єднання застосують полімерні клеї – епоксидні, силосанові, акрилові та ін. [1]. Така технологія дозволяє зменшити витрати матеріалів, трудовитрати, а також терміни ведення будівельних робіт. Як показують дослідження й практичний досвід, для реалізації таких з'єднань ефективним й економічно доцільним є застосування акрилових клеїв [1, 2]. Це визначається тим, що такі клеї володіють високими міцнісними та адгезійними властивостями, прості в приготуванні, мають регульовану в'язкість, достатню життєздатність, високу наповнюваність місця склеювання, тобто забезпечують його високу монолітність. Отже, вони характеризуються достатньо значними перевагами у порівнянні з іншими видами клеїв.

Постановка проблеми

Очевидно, що під час провадження таких будівельних робіт основним завданням є виконання надійного з'єднання бетону існуючої конструкції, наприклад, із новим бетоном, тобто забезпечення необхідної міцності збірної клейової конструкції. Аналіз опублікованих результатів досліджень показує, що на її міцність впливає ряд експлуатаційних і технологічних факторів, основними з яких є такі:

- клейові з'єднання впливу зовнішніх навантажень;
- склеюванню можуть підлягати бетони різної міцності (наприклад, при з'єднанні бетону існуючої конструкції з новим бетоном);
- площа з'єднання бетонів може бути різною;
- при склеюванні може застосовуватись різна товщина клейового шару [1, 2].

Зважаючи на вищенаведене, дослідження міцності збірних клейових конструкцій, реалізованих із застосуванням акрилових клеїв, при

впливі вказаних експлуатаційних і технологічних факторів є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наразі такі дослідження проводять із застосуванням руйнівного методу на зразках клейових з'єднань бетону [3]. При проведенні експериментів до попередньо виготовленого зразка клейової конструкції прикладають зовнішні навантаження – зусилля розтягу, вигину чи зсуву із застосуванням пресового обладнання, розривних машин тощо. Кінцевим вимірюваним параметром є міцність клейової конструкції [1, 2, 4–6]. При такій постановці експерименту достатньо складно встановити початок процесу утворення мікротріщин, тобто визначити те значення граничного зовнішнього навантаження на клейову конструкцію, яке призводить до початку, з подальшим розвитком, процесу зниження її міцності. В результаті такий підхід може викликати похибки у висновках досліджень, що, як наслідок, призведе до зниження надійності експлуатації реального будівельного об'єкта. Опубліковані результати проведених досліджень також не містять даних і рекомендацій щодо величини граничного зовнішнього навантаження на клейову конструкцію, при якому не відбувається зниження її міцності. На доповнення до цього, така методика унеможливує проведення (за необхідності) періодичного контролю стану тих клейових з'єднань бетону, що застосовані на реальних будівельних об'єктах.

Виклад основного матеріалу

Ідеологією розробленої методики досліджень клейових з'єднань бетону при впливі визначених експлуатаційних і технологічних факторів ультразвуковим імпульсним методом є наступні фізичні процеси. При визначеному зовнішньому навантаженні в клейовій конструкції виникають перенапруження, які в результаті призводять до появи в ній мікротріщин із подальшим розвитком процесу тріщиноутворення. Очевидно, що це викликає зниження її міцності. Фізичні основи неруйнівного ультразвукового імпульсного методу [7], а також досвід його застосування для вивчення фізико-механічних властивостей матеріалів під навантаженням, дають змогу зробити висновок про потенційну можливість його застосування для вирішення поставленої задачі [8]. У цьому разі теоретичною основою застосування ультразвукового імпульсного методу є залежність швидкості поширення ультразвукових коливань (V_i) і коефіцієнта загасання (α_i) інформаційного сигналу від відносної зміни фізико-механічних характеристик досліджуваного матеріалу [8].

Загальною метою вимірювального експерименту було дослідження динаміки струк-

турних змін (\check{S}) у клейових конструкціях, реалізованих на основі акрилових композицій, під впливом змінного зовнішнього навантаження (\check{P}). Відповідно до поставленого завдання, в програму експерименту входили такі дослідження клейових конструкцій:

1 – дослідження клейових конструкцій із бетонами різної міцності ($R_{ct,i}$) (різних класів);

2 – дослідження таких об'єктів при варіюванні товщини клейового шару (h_{ki});

3 – дослідження таких об'єктів при різній площі клейового з'єднання (H_i).

За контрольовані параметри при дослідженнях були обрані нормований час поширення (t_n) [8, 9], амплітуда (A) і тривалість першого напівперіоду (Δt) ультразвукового інформаційного сигналу. Вибір такого комплексу характеристик пружних хвиль обумовлений тим, що на додаток до нормованого часу поширення (t_n), амплітуда (A) та тривалість першого напівперіоду (Δt) найбільшою мірою реагують на зміни в структурі матеріалів (\check{S}) [8–10] і є непрямими характеристиками коефіцієнта загасання (α_i). Згідно з цим, вони можуть забезпечити достатній рівень інформативності вимірювального процесу, тобто необхідну вірогідність результатів дослідження. Комплекс досліджень містив дві наступні задачі.

Першою задачею був пошук взаємозв'язку між змінами в структурі клейової конструкції залежно від міцності (класу) ($R_{ct,i}$), площі склеюваного бетону (H_i) й величини зовнішнього навантаження (\check{P}). Метою дослідження було визначення початку й розвитку процесу тріщиноутворення в клейовому з'єднанні залежно від величини вказаних факторів. Дослідження цієї залежності проводилося на зразках клейових конструкцій, виготовлених із бетонів трьох класів: C8/10, C12/15 і C20/25. Як клей використовувалась акрилова клейова композиція (з додаванням кварцового піску як наповнювача). У цьому експерименті клейовим з'єднанням підлягали такі дві серії зразків бетону: перша серія зразків виготовлялася у вигляді призм поперечним перерізом $H_1 = 40 \times 40$ мм; друга серія – перерізом $H_2 = 70 \times 70$ мм. Виготовлені зразки склеювалися, а потім закріплювалися на пресі. Зовнішнє навантаження подавалося вертикально по довжині клейового з'єднання (рис. 1а). Тобто забезпечувався вплив механічних дискретно змінюваних зусиль зсуву при стисканні. Така методика навантаження на зразки застосовувалась в усіх експериментах.

Друга задача досліджень полягала в оцінці залежності початку процесу мікротріщиноутворення від товщини клейового шару під впливом дискретно змінюваного зовнішнього навантаження. Для вирішення цієї задачі використовували клейові з'єднання зразків бетону класу C12/15 двох таких перерізів: $H_1 = 40 \times 40$ мм і $H_2 = 70 \times 70$ мм.

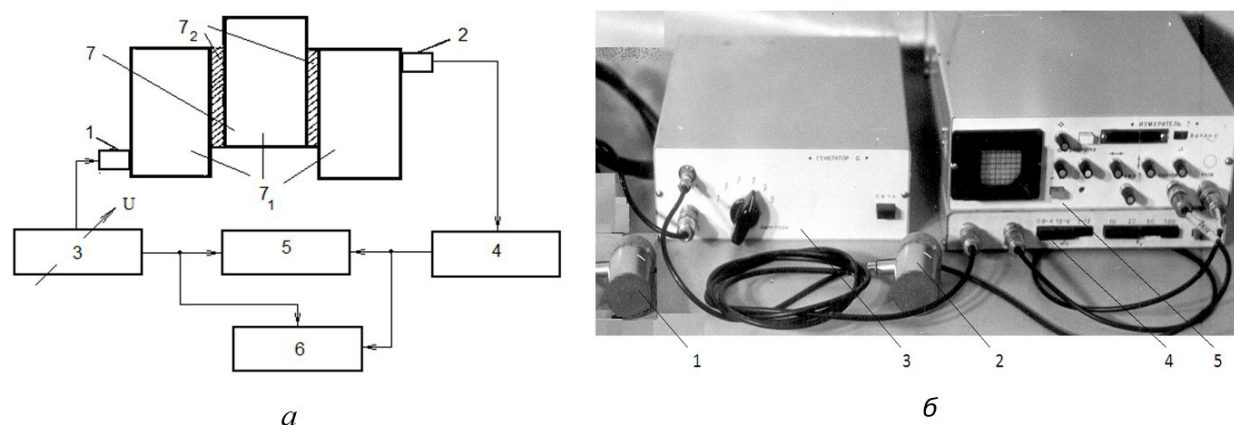


Рис. 1. Комплекс ультразвукової апаратури для дослідження процесу тріщиноутворення в клейових бетонних конструкціях: *a* – схема функціональна; *б* – загальний вигляд; 1, 2 – відповідно випромінювальний і приймальний п'єзоелектричні перетворювачі; 3 – генератор зондувальних імпульсів із регульованою напругою (U) на виході; 4 – підсилювач; 5 – осцилографічний індикатор із цифровим вимірником нормованого часу поширення ультразвуку; 6 – магнітограф; 7 – клейова конструкція (7_1 – бетонні зразки; 7_2 – шар клею)

На етапі виготовлення клейових конструкцій забезпечувалось такі три значення товщини клейового шару: $h_{k1} = 4$ мм, $h_{k2} = 8$ і $h_{k3} = 16$ мм. Як клей застосовувалась аналогічна акрилова клейова композиція.

Дослідження здійснювалися з використанням розробленого комплексу ультразвукової апаратури (рис. 1*a*, 1*б*).

Комплекс апаратури складається з випромінювального (1) й приймального (2) п'єзоелектричних перетворювачів; генератора зондувальних імпульсів (3) з можливістю регулювання амплітуди зондувального сигналу; підсилювача (4); осцилографічного індикатора з цифровим вимірником часу поширення ультразвуку (5); магнітографа (6). Ультразвукові п'єзоелектричні перетворювачі закріплювали на протилежних гранях клейової конструкції (рис. 1). Як контактне акустичне середовище використовувався клей.

Вимірювання визначених характеристик ультразвукових коливань виконувалося при дискретно змінюваній величині зовнішнього

навантаження на конструкцію (\tilde{P}) в діапазоні значень від $\tilde{P} = 0$ кН і до величини, при якій починалося руйнування клейової конструкції ($\tilde{P} = \tilde{P}_{руйн}$). Крок зміни навантаження становив 3 кН. Типові осцилограми інформаційного ультразвукового сигналу, що були зафіксовані протягом експерименту, наведені на рис. 2. Аналіз отриманих даних показав, що початок і розвиток процесу утворення мікротріщин у клейовій конструкції залежить як від міцності бетону ($R_{ст,i}$), площі клейового з'єднання (H_i), так і від товщини клейового шару (h_{ki}).

Так, для досліджуваної клейової конструкції, виготовленої зі зразків бетону першої партії, виявлено, що початок розвитку процесу тріщиноутворення спостерігається при значеннях зовнішнього навантаження:

$$\tilde{P} = \tilde{P}_s = (0,4 \dots 0,05) \tilde{P}_{руйн}$$

Конкретні значення величини зовнішнього навантаження (\tilde{P}_s), які зумовили початок процесу

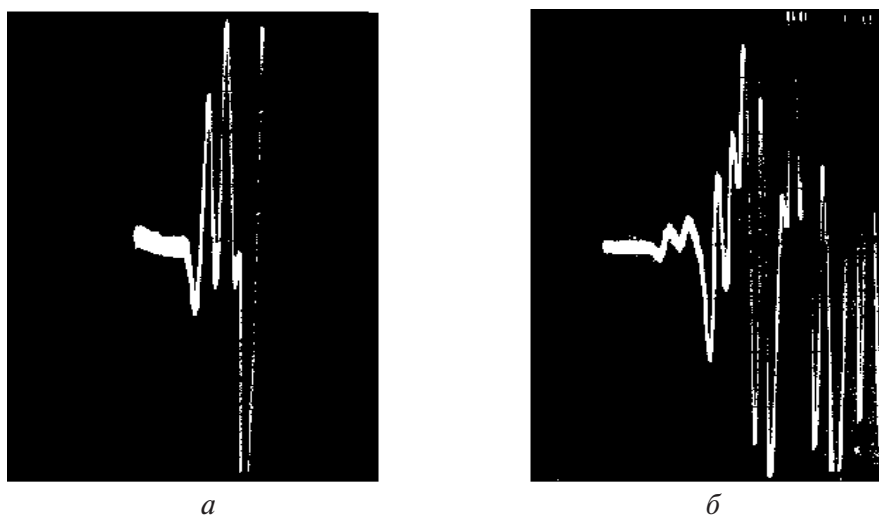


Рис. 2. Типові осцилограми інформаційного ультразвукового сигналу: *a* – клейова конструкція без прикладеного зовнішнього навантаження; *б* – клейова конструкція з прикладеним зовнішнім навантаженням 42 кН

утворення мікротріщин у клейовому з'єднанні для зразків першої партії бетонів, при товщині клейового шару $h_{k1}=4$ мм, становили: для бетону класу С8/10 початок процесу спостерігався при $P_S=12$ кН, для бетону класу С12/15 – при $P_S=15$ кН, а для бетону класу С20/25 – при $P_S=18$ кН.

Вплив зміни товщини клейового шару на процес тріщиноутворення досліджувався на зразках бетону класу С12/15. При експерименті виявлено, що процес утворення мікротріщин у конструкції з бетонними зразками перетином $H_1 = 40 \times 40$ мм, при товщині клейового шару $h_{k2}=8$ мм, починався при величині зовнішнього навантаження $\tilde{P}_S = 18$ кН. При збільшенні товщини клейового шару до $h_{k3}=16$ мм утворення мікротріщин у конструкції починалося при $\tilde{P}_S = 21$ кН. Аналогічно досліджувалися зразки клейових конструкцій другої партії (з бетону класів С8/10, С12/15, С20/25), поперечним перерізом $H_2 = 70 \times 70$ мм.

У процесі експерименту виявилося, що в загальному випадку величина зовнішнього навантаження, яка зумовлює початок процесу мікротріщиноутворення, становить $\tilde{P}_S = (0,3 \dots 0,4) \tilde{P}_{руйн}$.

Так, при товщині клейового шару $h_{k1}=4$ мм для бетону класу С8/10 величина $\tilde{P}_S=18$ кН; для бетону класу С12/15 – $\tilde{P}_S=24$ кН; для бетону класу С20/25 – $\tilde{P}_S=30$ кН. Зміна товщини клейового шару для зразків із бетону класу С12/15 зумовлює такі зміни величини \tilde{P}_S : при товщині клейового шару $h_{k2}=8$ мм величина зовнішнього

навантаження, що викликала початок процесу мікротріщиноутворення, становила $\tilde{P}_S = 30$ кН; при товщині $h_{k3}=16$ мм – величина $\tilde{P}_S = 36$ кН. Тобто міцність клейової конструкції підвищується при збільшенні клейового шару (до визначених його значень).

Зауважимо, що модель вимірювання при цьому визначатиметься зв'язком безпосередньо вимірюваних величин, які залежать від швидкості поширення та коефіцієнта загасання інформаційного сигналу, з фізико-механічними характеристиками досліджуваних клейових конструкцій, що підлягають визначенню [11].

Висновки

На основі використання ультразвукового імпульсного методу експериментально встановлено залежність величини зовнішнього навантаження на конструкцію, яке викликає початок процесу утворення мікротріщин, від міцності, перерізу бетону в місці клейового з'єднання й товщини клейового шару. Для забезпечення необхідної достовірності результатів при дослідженнях необхідно вимірювати комплекс характеристик інформаційного сигналу. Отримані результати досліджень дозволяють сформулювати рекомендації для практичного використання методики у виробничих умовах при виконанні робіт із реконструкції, ремонту чи відновлення бетонних і залізобетонних конструкцій експлуатованих будівельних об'єктів.

Methods and instrumentation for studying the strength of concrete joints in adhesive structures under the influence of operational and technological factors by the ultrasonic pulse method

Ya. Serikov, L. Nazarenko

O.M. Beketov National University of Urban Economics in Kharkiv, Marshala Bazhanova Str., 17, 61002, Kharkiv, Ukraine
s0509088828@gmail.com

Abstract

The use of concrete adhesive joints in repair and restoration works is an effective technological solution from technical and economical point of view. To make such joints, polymer glues are used, for example, epoxy, siloxane, acrylic, etc. The use of such technology reduces material consumption, labour costs, and time of construction works. The analysis of published research results showed that the use of acrylic adhesives is effective. When performing an adhesive concrete joint, the main task is to ensure the required strength of the adhesive structure during its operation. The analysis of publications revealed that the strength of the structure is influenced by the following main factors: external load, strength of concrete to

be glued, gluing area, and the thickness of the glue layer. Currently, the influence of the specified factors is being studied on samples of adhesive structures using mechanical, press equipment. During the experiments, external loads are applied to the manufactured sample of the adhesive structure, for example, tensile, bending or shear forces. The measured parameter is the strength of the adhesive structure. With such studies, it is difficult to determine the value of the maximum external load that leads to the formation of microcracks, which makes the strength of the structure reduce. As a result, this approach can cause an error in research conclusions, which will lead to a decrease in the reliability of operation of a real construction object. In addition, this approach makes it impossible to control the condition of those adhesive concrete structures that are used on real construction sites. The developed methods to study adhesive concrete structures using the ultrasonic pulse method are based on the dependence of the speed of propagation and attenuation coefficient of ultrasonic vibrations on the relative change in the structure of the material under consideration. The application of the developed methods and instrumentation for their implementation allows determining the value of the maximum permissible external load and ensuring the control of the state of adhesive structures in terms of crack formation on real construction sites.

Keywords: concrete; adhesive structures; load; strength; ultrasonic pulse method.

Список літератури

1. Золотова Н.М. Технологія з'єднання старого бетону з новим акриловими клеями: автореф. дис. канд. техн. наук. Дніпропетровськ, 2008. 128 с. URL: https://otherreferats.allbest.ru/construction/00439117_0.html#text
2. Шутенко Л.М., Серіков Я.О. та ін. Кріплення технологічного обладнання і металевих конструкцій до фундаментів та безпека праці: монографія. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2008. 285 с.
3. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
4. Rui-Xiang Cheng, Li Zhang, Ying Li. Study on bonding properties of PVC-based WPC bonded with acrylic adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2012, vol. 26, issue 24, pp. 2729–2735. doi:10.1080/01694243.2012.701477
5. Золотов С.М., Фірсов П.М. Витривалість модифікованих клейових з'єднань при багаторазово повторюваних динамічних навантаженнях. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т. 91. № 1. С. 185–192. doi: 10.29295/2311–7257–2018–91–1–185–192
6. Пустовойтова О.М., Камчатна С.М., Псурцева Н.О., Литвинова Г.М. Тривала міцність з'єднань бетонів при дії статичних навантажень. *Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: ХДУЗТ, 2016. Вип. 159. С. 84–90. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2016_159_14
7. Truell R., Elbaum C., Chick B. Ultrasonic methods in solid state physics. New York, Acad. Press, 1969. 464 p.
8. Серіков Я.О., Шутенко Л.М., Золотов М.С. та ін. Дослідження будівельних матеріалів, конструкційних елементів будинків і споруд та механічних систем неруйнівними методами на основі пружних хвиль: монографія. Харків: ІОЦ ХНАМГ, 2009. 260 с.
9. Serikov J. Research of technological properties of polymeric materials by the ultrasonic pulse method. *Proceedings of 5th World Congress on Ultrasonic WCU 2003*. Paris, France, 2003, pp. 87–88.
10. Серіков Я.О. Економічні та технологічні аспекти використання ультразвукового імпульсного методу при визначенні мікро- та макроструктурних дефектів у бетоні мостових споруд. *Строительство, материаловедение, машиностроение: зб. наук. праць*. Вип. 40. Дніпропетровськ: ПДАБА, 2007. С. 96–100.
11. Серіков Я.О. Розробка системи прогнозування й забезпечення безпечної експлуатації бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд на основі моделювання й ультразвукового імпульсного методу контролю. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід: матер. Міжнар. наук.-практ. конф.* Відень, Австрія, 21–24 листопада 2017 р. С. 307–312.

References

1. Zolotova N.M. Tekhnolohiya z'yednannya staroho betonu z novym akrylovymy kleyamy: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk [Technology of connecting old concrete with new acrylic adhesives: abstr. cand. tech. sci. diss.]. Dnipropetrovsk, 2008. 128 p. (in Ukrainian). Available at: https://otherreferats.allbest.ru/construction/00439117_0.html#text
2. Shutenko L.M., Serikov Ya.O. et al. Kriplennya tekhnolohichnoho obladnannya i metalevykh konstruksiy do fundamentiv ta bezpeka pratsi: monohrafiya [Fastening of technological equipment and metal structures to foundations and occupational safety: monograph]. Kharkiv, KhNUMG Publ., 2008. 285 p. (in Ukrainian).
3. DSTU B V.2.7-214:2009. Concretes. Methods of determination of strength according to control samples (in Ukrainian).
4. Rui-Xiang Cheng, Li Zhang, Ying Li. Study on bonding properties of PVC-based WPC bonded

- with acrylic adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2012, vol. 26, issue 24, pp. 2729–2735. doi:10.1080/01694243.2012.701477
5. Zolotov S.M., Firsov P.M. Vytryvalist modyfikovanykh kleyovykh z'yednan pry bahatorazovo povtoryuvanykh dynamichnykh navantazhennyakh [Endurance of modified adhesive joints under repeatedly repeated dynamic loads]. *Scientific Bulletin of Civil Engineering*, 2018, vol. 91, no. 1, pp. 185–192 (in Ukrainian). doi: 10.29295/2311–7257–2018–91–1–185–192
 6. Pustovoitova O.M., Kamchatna S.M., Psurtseva N.O., Lytvynova H.M. Tryvala mitsnist z'iednan betoniv pry dii statychnykh navantazhen [Long-term strength of concrete joints under the action of static loads]. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. Kharkiv, 2016, vol. 159, pp. 84–90 (in Ukrainian). Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2016_159_14
 7. Truell R., Elbaum C., Chick B. Ultrasonic methods in solid state physics. New York, Acad. Press, 1969. 464 p.
 8. Serikov Ya.O., Shutenko L.M., Zolotov M.S. et al. Doslidzhennya budivelnykh materialiv, konstruktsiynykh elementiv budynkiv i sporud ta mekhanichnykh system neruynivnymi metodamy na osnovi pruzhnykh khvyli: monohrafiya [Research of building materials, structural elements of buildings and structures and mechanical systems by non-destructive methods based on elastic waves: monograph]. Kharkiv, 2009. 260 p. (in Ukrainian).
 9. Serikov J. Research of technological properties of polymeric materials by the ultrasonic pulse method. *Proceedings of 5th World Congress on Ultrasonic WCU 2003*. Paris, France, 2003, pp. 87–88.
 10. Serikov Ya. Ekonomichni ta tekhnolohichni aspekty vykorystannya ultrazvukovoho impulsnoho metodu pry vyznachenni mikro- ta makrostrukturnykh defektiv u betoni mostovykh sporud [Economic and technological aspects of the use of ultrasonic pulse method in determining the micro- and macrostructures of defects in concrete bridge structures]. *Construction, materials science, engineering. Collection of scientific labours*. Dnipropetrovsk, 2007, issue 40, pp. 96–100 (in Ukrainian).
 11. Serikov Ya.O. Rozrobka systemy prohnozuvannya y zabezpechennya bezpechnoyi ekspluatatsiyi betonnykh i zalizobetonnykh konstruktsiy i sporud na osnovi modelyuvannya i ultrazvukovoho impulsnoho metodu kontrolyu [Development of the system of prediction and maintenance of safe operation of concrete and reinforced concrete constructions and structures on the basis of modeling and ultrasonic pulsed control method]. *Innovative technologies in science and education. European experience: Proceedings of International Conference*. Vienna, Austria, November 21–24, 2017, pp. 307–312 (in Ukrainian).