

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВАЖКОГО БЕТОНУ ЗА ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВИСОКИХ РІВНІВ

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF HEAVY CONCRETE UNDER SMALL CYCLE LOADING OF HIGH LEVELS

Панчук Ю.М., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне), **Дробишинець С.Я., к.т.н., доцент**, ORCID 0000-0002-9060-7716, **Сунак П.О., к.т.н., доцент**, ORCID 0000-0002-2405-3380 (Луцький національний технічний університет), **Парнета О.Б., студент**, ORCID 0000-0002-6375-7903 (Національний університет «Львівська Політехніка»)

Panchuk Y.M., candidate of technical sciences, associate professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Drobyshynets S.Y., candidate of technical sciences, associate professor**, Sunak P.O., **candidate of technical sciences, associate professor** (Lutsk National Technical University), **Parneta O.B., student** (Lviv Politechnic National University)

Наведено результати експериментальних досліджень напружено-деформованого стану зразків призм із важкого бетону при дії циклічних навантажень високих рівнів. Отримано залежності зміни відносних поздовжніх та поперечних деформацій і діаграми лінійних кореляційних залежностей січних модулів важкого бетону. Побудовано діаграми об'ємного деформування бетону. Встановлено межу малоциклової втомленості бетону, що склала $\eta_{\text{cyc}} = 0,747$.

Structural elements are exposed to cyclic loads, the effect of which on the strength and deformation properties of the material has not been studied sufficiently. The impact of such loads can cause special destruction in structures, in which deformations will increase significantly under cyclic loads, not exceeding the single limit load. The purpose of the work is an experimental and theoretical study of the stress-strain state of heavy concrete prism specimens under the action of high-level cyclic loads. The methodology and results of experimental studies of the stress-strain state of heavy concrete prism specimens under high-level cyclic loading are presented. The upper level of low-cycle loading affects the performance of concrete. The dependences of the change in relative longitudinal and transverse deformations and the diagrams of linear correlation dependences of the secant

moduli of longitudinal and transverse deformations of concrete prisms under low-cycle loads of high levels were obtained. A sequential three-stage deformation of concrete has been established: Stage I - gradual decrease in the increase in deformations and the width of hysteresis loops; Stage II - stabilization of the increase in deformations, hysteresis loops at the loading stages repeat each other; Stage III - increase in the increase in deformations, the width of hysteresis loops. The constructed volumetric deformation diagrams allow us to trace the trend of concrete deformation with increasing number of load application cycles. The low-cycle fatigue limit of the studied concrete was established at $n_{cyc} \rightarrow \infty$, the value of $\eta_{cyc} = 0.747$. Repeated high-level compressive loads lead to gradual decompression of the structure from cycle to cycle, "grinding" of the material, and its destruction occurs.

Ключові слова: Бетон, напружено-деформований стан, напруження, міцність, деформівність, циклові навантаження, модуль пружності, стиск. Concrete, stress-strain state, tension, strength, deformation, cyclic loads, modulus of elasticity, compression.

Вступ. Якість будівельного виробництва визначається комплексом ознак надійних проектних рішень, прогресивних будівельних матеріалів, виробів і конструкцій, а також сучасних і передових технологій виконання будівельно-монтажних робіт. Щоб унеможливити утворення суттєвих дефектів під час будівництва і експлуатації споруд, вони повинні розраховуватись з врахуванням реальних схем. Недосконалі методи розрахунку не відповідатимуть дійсній роботі будівельних конструкцій, це може привести до завищених запасів міцності або до виникнення дефектів у певних частинах конструкцій.

Тому найбільш точний метод розрахунку окремих елементів конструкцій, будівель і споруд в цілому, базуватиметься на розрахункових схемах, прийнятих без спотворення реальної роботи конструкції. У зв'язку з цим складні інженерні задачі не можуть вирішуватись лише теоретичним шляхом, мають спиратись на дані, перевірені експериментальними дослідженнями. Вивчення реальної роботи будівельних конструкцій дозволяє виявити недоліки теорії, встановлює дійсні значення деформацій конструктивних елементів на різних стадіях їх роботи: при пружній роботі і під час виникнення та розвитку тріщин.

Аналіз останніх публікацій. Проектування та виготовлення економічних конструкцій, які забезпечуватимуть надійну роботу будівель, споруд та їх елементів протягом всього періоду експлуатації, виконують шляхом удосконалення розрахунку будівельних конструкцій з урахуванням особливостей роботи бетону в реальних умовах [1,2]. Елементи конструкції зазнають впливу циклічних навантажень, дія яких на міцнісні та деформативні властивості матеріалу вивчена недостатньо. Вплив таких

навантажень може викликати в конструкціях особливі руйнування, при яких деформації будуть значно зростати за циклічних навантажень [3-10], що не перевищують одноразового граничного навантаження.

Мета роботи – це експериментально-теоретичне дослідження напружено-деформованого стану зразків призм із важкого бетону при дії циклічних навантажень високих рівнів

Методика експериментальних досліджень. Для вивчення властивостей міцнісних та деформативних характеристик важкого бетону на дію циклічних навантажень високих рівнів були виготовлені і досліджені зразки призм, розміром 150х150х600мм. Підбір матеріалів, склад бетону, а також методика виготовлення дослідних зразків призм наведені в [11]. Вплив циклічних стискаючих навантажень на міцнісні та деформативні характеристики бетонів визначали відповідно до розробленої методики досліджень [12]. Бетонні призми випробовували циклічними навантаженнями на гідравлічному пресі П-250. Зразки завантажували до верхнього рівня з незмінною швидкістю напружень ($0,6 \pm 0,2$ МПа/с) величинами навантажень рівними 10% від очікуваного руйнівного навантаження. На кожному ступені навантаження виконували витримку на протязі 4...5 хвилин для виділення пластичних деформацій. Так само ступенями здійснювали розвантаження зразків до нижнього рівня, який приймали рівним нулю. Число циклів прикладання навантаження на бетонні зразки при дослідженнях не обмежували і визначали кількістю циклів, які витримував зразок до руйнування. Для виключення впливу зміни міцнісних характеристик бетону протягом часу, зразки випробували у віці 350...371 доби. Значення поздовжніх та поперечних деформації бетонних призм вимірювали тензорезисторами з базою 50 мм. Для контролю вимірювання поздовжніх та поперечних деформацій виконували за допомогою індикаторів годинникового типу. При сталому нижньому рівні навантаження, який приймали рівним нулю, величина верхнього рівня навантаження приймалась рівною 0,78...0,88 Р_б. Під час випробувань зразків призм фіксували: число циклів навантажень до руйнування зразка; значення поздовжніх та поперечних деформацій бетону на циклах навантаження і розвантаження.

Результати досліджень. Після обробки експериментальних даних випробувань малоцикловими навантаженнями призмових бетонних зразків, були отримані діаграми залежностей $\eta - \epsilon_l$; $\eta - \epsilon_{tr}$ (рис.1) і $E'_{bl} - \eta$; $E'_{btr} - \eta$ на (рис.1), де: ϵ_l , ϵ_{tr} - відносні поздовжні і поперечні деформації; E'_{bl} , E'_{btr} - січні модулі поздовжніх і поперечних деформацій; $\eta = \sigma/R_b$ - рівень напруження зразків призм в циклах за малоциклового стиску.

Лінійні рівняння регресії $E'_{bl} - \eta$ і $E'_{btr} - \eta$ були побудовані за дослідними точками, з використанням методу найменших квадратів. Статистична обробка дослідних даних підтвердила лінійність залежностей $E'_{bl} - \eta$ і $E'_{btr} - \eta$, та їх збіг з дослідними значеннями січного модуля.

Отримані петлі пластичного гістерезису поздовжнього та поперечного деформування бетону (рис.2), визначені прирости максимальних та залишкових деформацій, наведені в табл.1.

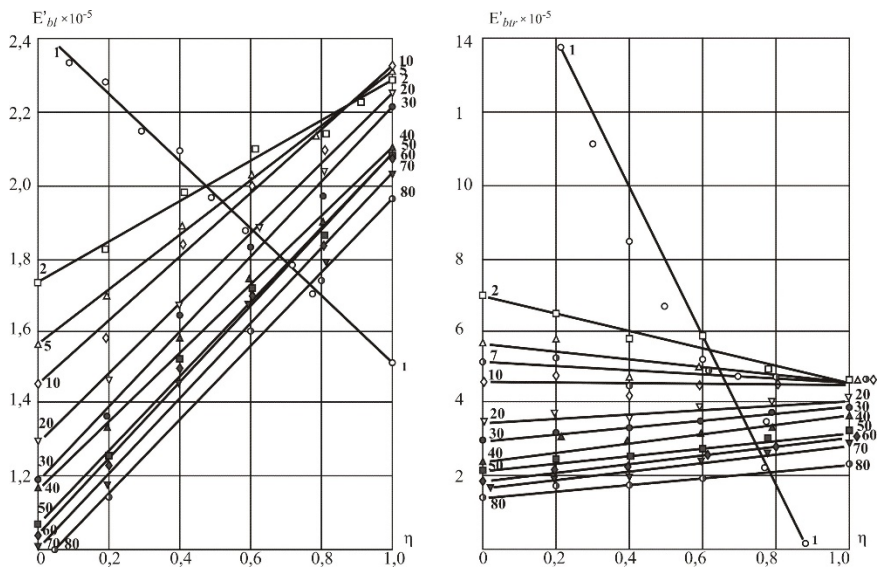


Рис. 1. Діаграми лінійних кореляційних залежностей $E'_{bl} - \eta$; $E'_{blr} - \eta$ побудовані для зразків призми при малоциклового тискаючому навантаженні

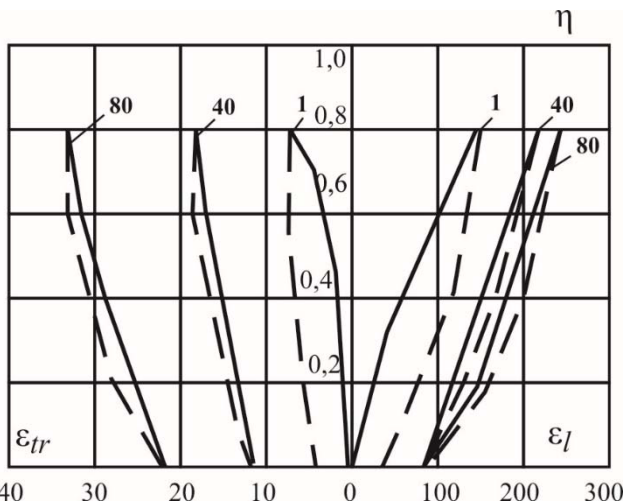


Рис. 2. Зміна поздовжніх і поперечних деформацій бетону $\epsilon_l \times 10^{-5}$; $\epsilon_{tr} \times 10^{-5}$

Таблиця 1

Значення максимальних та залишкових приростів поздовжніх і поперечних деформацій бетону, визначені при малоциклових навантаженнях

Діапазон циклів навантаження $n_{\text{цик}}$	$\Delta \varepsilon_{bl}, \text{ max}$	$\Delta \varepsilon_{bl}, \text{ min}$	$\Delta \varepsilon_{btr}, \text{ max}$	$\Delta \varepsilon_{btr}, \text{ min}$
1...5	19,38	11,44	30,40	18,30
5...10	10,68	7,56	15,70	11,30
10...15	7,26	4,58	16,00	10,00
15...20	4,86	3,56	10,00	8,20
20...25	5,14	3,18	8,30	6,10
25...30	5,00	2,04	8,70	5,20
30...35	2,80	1,06	11,70	7,40
35...40	5,32	2,68	7,80	5,20
40...45	3,68	2,50	11,40	7,90
45...50	5,12	4,50	16,00	11,30
50...60	6,57	4,50	21,00	14,70
60...70	8,01	2,58	40,00	36,10
70...80	8,30	4,00	58,30	37,90
80...89	15,88	10,80	88,70	100,40

З таблиці 1 видно, що в бетоні, дослідженому малоцикловими навантаженнями, відбувались три послідовні стадії деформування. На стадії I проходило зменшення приростів деформацій бетону протягом перших 10..15-ти циклів, відбувалось вибирання пластичних деформацій, перерозподіл зусиль між заповнювачем та в'язучим, прослідковувалось «затухання» розуцільнення бетону, проходило утворення основних поздовжніх та поперечних мікротріщин, які розвивались і призводили до руйнування структури бетону. На цій стадії діаграма « $\sigma - \varepsilon$ » при навантаженні обернена до осі напружень, а при розвантаженні – до осі деформацій, відмічене поступове зменшення ширини петель пластичного гістерезису зі зростанням кількості циклічних навантажень. Стадія II характеризувалась стабілізацією приростів деформацій, деформування бетону набувало пружного характеру, вітки гістерезису висхідні і низхідні практично повторювали одна одну, мали лінійні залежності. На стадії III спостерігалось поступове від цикла до циклу збільшення приросту деформацій, відбувалось розуцільнення та руйнування бетону, що супроводжувалось інтенсивним розвитком тріщин, а також порушенням зв'язку між заповнювачем і цементною матрицею (заповнювач «перемелював» цементну складову бетону). Вітки діаграм « $\sigma - \varepsilon$ » на циклах навантаження і розвантаження обернені до осі деформацій, ширина петель пластичного гістерезису зростала зі збільшенням кількості циклічних навантажень.

Максимальні деформації бетону, виміряні перед руйнуванням зразків, збільшились в порівнянні з відповідними, визначеними на 1-му циклі навантаження в поздовжньому напрямку в 1,36...1,74 рази, в поперечному - в 2,79...6,54 рази. Зразки бетонних призм руйнувались внаслідок значного розвитку поперечних деформацій, спричинених циклічними навантаженнями.

На рис.1 дослідно-кореляційні прямі $E'_{bl} - \eta$ і $E'_{btr} - \eta$, побудовані при різних циклах навантаження, вони утворюють віяльну діаграму і намагаються перетнутись в параметричній точці С, наявність якої дає можливість прогнозувати напружено-деформований стан окремого виду бетону при різній кількості циклів навантаження в діапазоні напружень $0 \leq \eta \leq 1$.

На першому циклі навантаження в бетонних призмах відбувались основні процеси утворення тріщин, з наступного циклу прикладання навантаження зразки випробовували з тріщинами, утвореними на першому циклі. Тому рівняння кореляційної прямої, отримане на першому циклі навантаження при розгляді сімейства кореляційних прямих, визначених на інших циклах до уваги не приймалося.

В результаті отримані значення січного модуля деформацій $E'_{bl,cyc}$ і $E'_{btr,cyc}$ при циклічних стискаючих навантаженнях в межах напружень $0 \leq \eta \leq 1$:

$$E'_{bl,cyc} = [E_{bl1} - 1,534 (n_{cyc} - 1) / (3,374 + n_{cyc})] (1 - 0,8803\eta) + 2,087\eta \quad (1)$$

$$E'_{btr,cyc} = [E_{btr2} - 6,258 (n_{cyc} - 2) / (12,093 + n_{cyc})] (1 - 0,8271\eta) + 3,520\eta \quad (2)$$

Значення повних силових деформацій:

$$\epsilon_{bl,cyc} = R_b \eta / E'_{bl,cyc} \quad (3)$$

$$\epsilon_{btr,cyc} = R_b \eta / E'_{btr,cyc} \quad (4)$$

Як було відмічено під час стискаючих навантажень відбувалась зміна об'єму бетонних зразків, яка зумовлена трьох стадійним деформуванням. Така зміна об'ємних деформацій визначалась деструктивними процесами, що проходили в бетоні. Діаграма об'ємного деформування $(\epsilon_v - \eta)$ бетонних зразків за малоциклових стискаючих навантажень із зміною кількості циклів навантаження наведені на рис. 3.

Максимальне об'ємне ущільнення на 1-му циклі навантаження склало $41,12 \times 10^{-5}$, при наступному зростанні кількості циклічного навантаження відбувалось зменшення об'єму. Так, на 2-му і 5-му циклах повторного навантаження величини зменшились і набули відповідних значень $23,28 \times 10^{-5}$ і $19,81 \times 10^{-5}$, на 10-му, 20-му і 30-му циклах навантаження становили відповідно $14,45 \times 10^{-5}$, $7,66 \times 10^{-5}$ і $5,16 \times 10^{-5}$. З 40-го циклу і до руйнування бетону, яке відбулось на 89 циклі, об'ємні відносні деформації бетону набули від'ємних значень і продовжували зменшуватись із зростанням кількості циклів прикладання навантаження, проходив процес незворотного руйнування бетону.

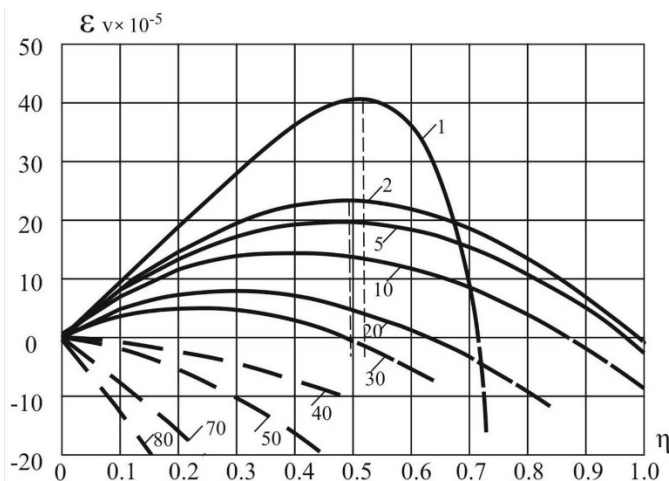


Рис. 3 Діаграма об'ємного деформування бетону за малоциклового осьового стиснення

Була визначена малоциклова втомленість бетонну шляхом циклічних навантажень-розвантажень зразків до тих пір, поки не наступало їх руйнування. Малоциклову втомленість бетону представили дрібно-лінійною функцією у вигляді залежності $\eta_{\text{сyc}} - n_{\text{сyc}}$:

$$\eta_{\text{сyc}} = 1 - 0,253(n_{\text{сyc}} - 1)/(n_{\text{сyc}} + 11,490); \quad (5)$$

З отриманої залежності видно, що при граничних значеннях вона набуває фізичного змісту, так при $n_{\text{сyc}} \rightarrow \infty$ значення $\eta_{\text{сyc}} = 0,747$, що відповідає межі малоциклової втомленості. Залежність представлена кривою гіперболічного типу в осях координат «рівень напружень $\eta_{\text{сyc}}$ – кількість циклів навантаження $n_{\text{сyc}}$ », що витримував зразок до руйнування (рис.4).

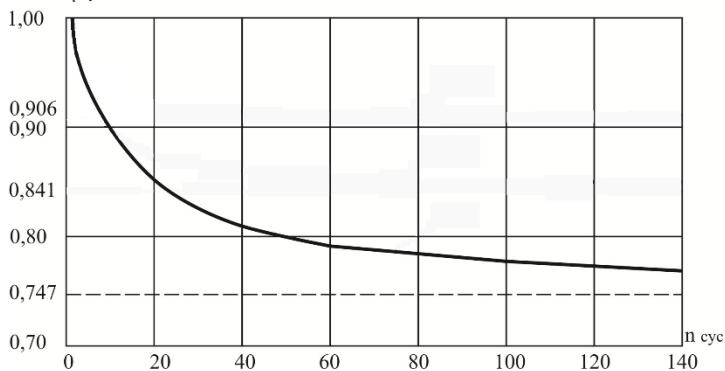


Рис. 4 Малоциклова втомленість бетону

Висновки та рекомендації

1) За результатами обробки дослідних даних побудовані діаграми залежностей $\eta - \varepsilon_t$; $\eta - \varepsilon_{tr}$ і $E'_{bt} - \eta$; $E'_{btr} - \eta$.

2) Бетон, випробуваний малоцикловими навантаженнями, проходив три послідовні стадії деформування: стадія I – поступового зменшення приросту деформацій і ширини петель гістерезису; стадія II – стабілізації приросту деформацій, петлі гістерезису на етапах навантажень повторюють одна одну; стадія III – збільшення приросту деформацій, ширини петель гістерезису.

3) Верхній рівень малоциклового навантаження впливає на роботу бетону за малоциклових навантажень.

4) Побудовані діаграми об'ємного деформування, дозволяють простежити за тенденцією деформування бетону із зростанням кількості циклів прикладання навантаження.

5) Повторні навантаження високих рівнів призводять до поступового від циклу до циклу розуцільнення структури матеріалу і відбувається його руйнування.

6) Встановлена межа малоциклової втомленості дослідженого бетону при $n_{cyc} \rightarrow \infty$ значення $\eta_{cyc} = 0,747$.

Отримані результати досліджень роботи бетону на вплив малоциклових стискаючих навантажень високих рівнів мають бути враховані при розрахунку будівельних конструкцій та їх елементів.

1. Dovbenko V., Kukhniuk O., Homon S., Ivaniuk A., Aleksiiyevets V., Savytska O., Kulakovskiy L., 2024. Study of the strength properties of concrete impregnated with a polymer composition. *Procedia Structural Integrity* 59, 702-709.

2. Dvorkin, L., Bordiuzhenko, O., Zhitkovsky, V., Gomon, S., & Homon, S. (2021). Mechanical Properties and Design of Concrete with Hybrid Steel and Basalt Fiber. *E3S Web of Conferences*, 264, article number 02030.

3. Кухнюк О.М. Вплив малоциклових навантажень на опір крупнозернистого бетону осьовому стиску. *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: РДТУ, 1999. Випуск 2. С. 117-121.

Kukhnyuk O.M. Vplyv malotsyklovykh navantazhen' na opir krupnozernystoho betonu os'ovomu stysku. *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy*. Rivne: RDTU, 1999. Vypusk 2. S. 117-121.

4. Гомон С.С. Робота та несуча здатність косостиснутих залізобетонних елементів за малоциклових навантажень: автореф. дис. канд. техн. наук 05.23.01. Рівне: НУВГП, 2008. 21 с.

Homon S.S. Robota ta nesucha zdatnist' kosostysnutykh zalizobetonnykh elementiv za malotsyklovykh navantazhen': avtoref. dys. kand. tekhn. nauk 05.23.01. Rivne: NUVHP, 2008. 21 s.

5. Бабич Є.М., Філіпчук С.В. Дослідження переміщень замкнутих залізобетонних рам при повторних короткочасних навантаженнях. *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2007. С. 106-113.

Babych YE.M., Filipchuk S.V. Doslidzhennya peremishchen' zamknytykh zalizobetonnykh ram pry povtornykh korotkochasnykh navantazhennyakh.

Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Rivne: NUVHP, 2007. S. 106-113.

6. Ромашко В.М., Гомон С.С. Методика експериментальних досліджень роботи косостиснутих залізобетонних елементів за змінних рівнів навантажень. *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди.* Рівне: НУВГП, 2005. Випуск 12. С. 280-288.

Romashko V.M., Homon S.S. *Metodyka eksperymental'nykh doslidzhen' roboty kosostysnutykh zalizobetonnykh elementiv za zminnykh rivniv navantazhen'.* Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Rivne: NUVHP, 2005. Vypusk 12. S. 280-288.

7. Drobysheynets S., Babych Y., Sunak P., Zadorozhnikova I., Parfentyeva I., Pakharenyk V., Homon S., 2024. Experimental and theoretical studies of fatigue of steel fibre reinforced concrete under low-cycle compression. *Procedia Structural Integrity* 59, 601-608.

8. Гомон С.С., Стадник І.П. Вплив малоциклових навантажень на прогини косостиснутих залізобетонних елементів в аварійному режимі роботи. *Містобудування та територіальне планування.* Київ: КНУБА, 2011. Випуск 40 (1). С. 296-301.

Homon S.S., Stadnyk I.P. *Vplyv malotsyklovykh navantazhen' na prohyny kosostysnutykh zalizobetonnykh elementiv v avariynomu rezhymi roboty.* Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya. Kyiv: KNUBA, 2011. Vypusk 40 (1). S. 296-301.

9. Korniyshchuk O., Masiuk G., Homon S., Aleksiievets I., Chapiuk O., Kaynts D., Rizak V., 2024. Deformability of reinforced concrete beams under the action of repeated alternating loads. *Procedia Structural Integrity* 59, 575-582.

10. Гомон С.С. Прогини косостиснутих залізобетонних елементів при дії малоциклових навантажень. *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди.* Рівне: НУВГП, 2009. Випуск 18. С. 157-162.

Homon S.S. *Prohyny kosostysnutykh zalizobetonnykh elementiv pry dii malotsyklovykh navantazhen'.* Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Rivne: NUVHP, 2009. Vypusk 18. S. 157-162.

11. Панчук Ю.М. Експериментальні дослідження пружно-пластичних властивостей крупнозернистого бетону за малоциклових навантажень високих рівнів. *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди.* Рівне: НУВГП, 2012. Випуск 23. С. 372-377.

Panchuk YU.M. *Eksperymental'ni doslidzhennya pruzhno-plastychnykh vlastyvostey krupnozernystoho betonu za malotsyklovykh navantazhen' vysokykh rivniv.* Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Rivne: NUVHP, 2012. Vypusk 23. S. 372-377.

12. Панчук Ю.М. Методика і результати експериментальних досліджень малоциклової втомленості бетону. *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди.* Рівне: НУВГП, 2016. Випуск 32. С. 237-242.

Panchuk YU.M. *Metodyka i rezul'taty eksperymental'nykh doslidzhen' malotsyklovoyi vtomlenosti betonu.* Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Rivne: NUVHP, 2016. Vypusk 32. S. 237-242.