

## **ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК МОСТІВ ПРИ ДІЇ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

*Описана проблема впливу малоциклових навантажень на попередньо напружені конструкції прогонових будов мостів. Емпірично визначено коефіцієнти для розрахунку ширини розкриття максимальної нормальної тріщини та прогинів в балкових попередньо напружених залізобетонних лабораторних зразках при малоциклових навантаженнях.*

*Ключові слова: попередньо напружений залізобетон, малоциклові навантаження, ширина розкриття максимальної нормальної тріщини, прогин.*

*The problem of low-cycle loads influence on prestressed bridge slab structures described. The coefficients for calculation of crack maximum disclosure width and deflections for beam posttensioned reinforced concrete laboratory samples under low-cycle loads influence were empirically determined.*

*Keywords: posttensioned reinforced concrete, low-cycle load, maximum width disclosure of normal crack, deflection.*

*Вступ.* Згідно діючих нормативних документів з проектування мостів[1,2,3], щоб забезпечити достатню довговічність мостів необхідно враховувати роботу конструкції на протязі всього проектного терміну експлуатації для сприйняття розрахункових навантажень та забезпечення необхідної вантажопідйомності. На експлуатаційний термін конструкцій впливає фізичне зношення матеріалів конструкцій внаслідок впливу зовнішніх факторів.

Одною з найпоширеніших причин утворення дефектів в конструкціях мостів є неврахування постійного росту інтенсивності транспортних потоків та ваги транспортних засобів. Потрібно переглянути існуючий підхід до врахування в розрахунках циклічної дії навантаження високого рівня при експлуатації для забезпечення необхідного терміну їх експлуатації[4].

*Постановка проблеми.* Зовнішні навантаження розділяються на постійні та змінні, а останні за характером дії можуть бути монотонно-змінними та циклічними (малоцикловими, періодичність повторення яких може сягати декількох десятків, сотень, а деколи й тисяч циклів, і багатоцикловими з періодичністю повторення більше, ніж  $2 \times 10^6$  циклів). Особливе місце мають малоциклові навантаження високого рівня до  $0,6 \dots 0,8 R_{cr}$ , які суттєво знижують несучу здатність конструкції.

Залізобетонні конструкції схильні до крихкого руйнування, тобто до руйнування через розповсюдження дефектів типу тріщин. Процес руйнування при цьому не відбувається миттєво – від моменту утворення тріщини і до початку її критичного зростання минає певний час. Тому своєчасне виявлення таких дефектів є важливою задачею, і, разом з тим, складною проблемою[4].

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Дослідження тріщиностійкості та деформативності попередньо напружених елементів при малоциклових навантаженнях проводили Бабич Є.М., Бабич В.Є., Барашиков А.Я., Панчук Ю.М., Крусь Ю.О., Валовий О.І., Шевченко Б.Н., Погореляк А.П., Полюга Р.І., Стоянович С.В. [5,6,7,8,9,10,11,12,13,14] та інші. При дослідженні різних балок та плит з попередньо напруженим та змішаним армуванням були отримані дані про збільшення ширини розкриття тріщин та зростання прогинів при дії малоциклових навантажень високого рівня. Експериментальні результати приросту ширини розкриття тріщин за даними різних досліджень суттєво відрізняються. Це свідчить про необхідність проведення експериментальних досліджень для уточнення впливу малоциклових навантажень на роботу залізобетонних попередньо напружених конструкцій.

Ширина розкриття тріщин у залізобетонних конструкціях мостів визначається за формулою 3.6 ДБН [3] без врахування дії малоциклових навантажень:

$$a_{cr} = \frac{\sigma}{E} \psi \leq \Delta_{cr}, \quad (1)$$

де  $a_{cr}$  - ширина розкриття тріщини;

$\sigma$  – розтягувальне напруження що дорівнює для напруженої арматури збільшенню напружень  $\Delta\sigma_p$  у найбільш розтягнутих (крайніх стержнях) після погашення обтиснення бетону;

$E$  – модуль пружності  $E_p$  попередньо напруженої арматури;

$\psi$  – коефіцієнт розкриття тріщин, що визначається в залежності від радіусу армування  $R_r$ ;

$\Delta_{cr}$  – граничне значення розрахункової ширини розкриття тріщин.

Обчислення прогинів балок згідно норм [3] допускається робити чисельними прийомами, використовуючи вираз :

$$f = \sum \bar{M}(x) \frac{1}{\rho}(x) \Delta x, \quad (2)$$

У якому  $\bar{M}(x)$  і  $\frac{1}{\rho}(x)$  – середні величини згинального моменту і

кривизни на окремих ділянках  $\Delta x$ , де зміна зазначених параметрів має плавний характер.

*Метою* роботи було експериментальне виявлення впливу малоциклових навантажень високого рівня на ширину розкриття тріщин попередньо напружених залізобетонних балок. Для цього використали схему прикладання малоциклових навантажень використану Полугою Р.І. [9] для балок аналогічних розмірів із звичайною арматурою.

Об'єктом досліджень була серія з чотирьох попередньо напружених залізобетонних балок. Розміри залізобетонних балок були прийняті 2100×210×100мм. Залізобетонні балки випробовувались у віці 850-1000 діб за схемою чистого згину, навантаження прикладалось у третях прогону. Конструкція дослідних балок і схема армування приведена на рис. 2.

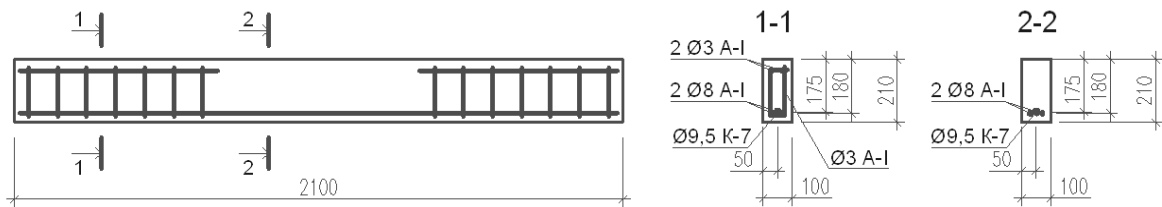


Рис. 1. Конструкція дослідних зразків балок.

Дослідження балок проводили на стаціонарному силовому стенді. Навантаження через силорозподільчу траверсу передавалось на балку. Таким чином створювалась зона чистого згину, в межах якої досліджували напружено-деформований стан нормальних перерізів по висоті балки. Величина навантаження регулювалась за допомогою попередньо протарованого кільцевого динамометра. Його встановили між домкратом та опорною силовою траверсою стенду. Відліки за індикатором динамометра знімали відразу після досягнення необхідного рівня навантаження та контролювали на протязі всієї ступені. Стенд позволяв вести візуальне спостереження за виникненням та поширенням тріщин на гранях балки. Ширину розкриття тріщин при випробуваннях визначали за допомогою мікроскопа МПБ-2 із ціною поділки 0,05 мм. Вимірювання проводили на кожній ступені навантаження з моменту появи тріщин. Прогини виміряли прогиномірами Аістова на опорах та індикаторами з ціною поділки 0,01мм посередині балки після витримки на кожному привантаженні.

Базою випробувань на малоциклові навантаження було прийнято число  $N=10$  циклів. На балках-близнюках Б-1 і Б-2 при одноразовому статичному завантаженні були визначені значення руйнівного навантаження  $R_{cr}$ . Базовим рівнем навантаження, до якого доводилися зразки Б-3 та Б-4, прийнято  $0,6R_{cr}$ . Для того, щоб моделювати довантаження конструкції до вищого рівня, після перших шести циклів з максимальним рівнем навантаження  $0,6R_{cr}$ , на сьомому і восьмому циклі рівень навантаження був доведений до  $0,75R_{cr}$ . Дев'ятий цикл був проведений з максимальним рівнем навантаження  $0,6R_{cr}$ , десятий – знову до  $0,75R_{cr}$ . Після бази випробувань балки були доведені до руйнування одноразовим прикладенням зусилля з фіксацією руйнівного навантаження.

Рівні навантажень були призначені згідно параметрів циклів роботи автодорожніх мостів, які в середньому становлять  $\eta_{top}=0,6\dots 0,8$  [9]. Послідовність рівнів навантаження по циклах також визначена на основі спостережень руху великовантажних навантажень по автодорожніх мостах.

Аналіз тріщиностійкості балок проводився наступним чином. Після кожної ступені навантаження кожного циклу замірялась ширина розкриття всіх нормальних тріщин на рівні попередньо напруженої арматури з визначенням тріщини з максимальним розкриттям (табл. 1). Теоретичне значення ширини розкриття тріщин на зазначених величинах навантаження вираховане згідно норм [3]. Після сумування заміряних значень визначалось процентне співвідношення збільшення ширини розкриття всіх тріщин балки та максимально розкритої тріщини відносно величини, отриманої на першому циклі навантаження (табл. 2). Приріст ширини розкриття тріщин при  $0,6P_{cr}$  враховувався відносно ширини розкриття на першому циклі. Приріст ширини розкриття тріщин при  $0,75P_{cr}$  враховувався відносно середнього значення ширини розкриття при аналогічному навантаженні на Б-1 та Б-2.

Слід зазначити, що всі тріщини в балці утворюються на першому циклі. При повторних завантаженнях рівня  $0,6P_{cr}$  відбувається лише їх розвиток без утворення нових. Утворення нових тріщин спостерігалось при збільшенні максимального навантаження на 7-му циклі та при монотонному прикладанні навантаження до руйнування балок після 10-го циклу. Загалом якісна картини розвитку всіх тріщин по балках ідентична.

Величина ширини розкриття тріщин після семи циклів привантаження до  $0,6P_{cr}$  становить в середньому  $0,29\text{мм}$ , що більше розрахункового значення  $0,27\text{мм}$ . А при восьмому та десятому циклі ( $0,75P_{cr}$ ) –  $0,69$  та  $0,675$  мм, що перевищує розрахункове значення  $0,47\text{мм}$ .

**Збільшення ширини розкриття у % в залежності від рівня навантаження (відносно першого циклу з даним рівнем) та відповідні коефіцієнти**

Серія 1	Шифр	Тріщина з макс.розкриттям	
		0,6P <sub>cr</sub> (після 7-ми циклів з рівнем)	0,75P <sub>cr</sub> (після 10-х циклів з довантаження до рівня)
	Б-3	33,33	48,24
	Б-4	48	69,41
Сер. значення		40,67	58,83
$\psi_{сус}^{сгс}$		1,41	1,59

При малоцикловому навантаженні конструкцій до рівня  $0,6P_{cr}$  максимальна ширина розкриття тріщини збільшилась в середньому на 40,67%, тому коефіцієнт прийнято  $\psi_{сус}^{сгс} = 1,41$ . Після довантажень до рівня  $0,75P_{cr}$  це значення змінилось (відносно ширини розкриття максимальної тріщини при випробуванні на статичне навантаження на рівні  $0,75P_{cr}$ ) – і становило 58,83%. Тому коефіцієнтом, що враховує такий рівень малоциклових навантажень, визначено  $\psi_{сус}^{сгс} = 1,59$ .

При порівнянні розрахункових ширин розкриття тріщин дослідних балок та експериментальних даних отримано, що коефіцієнт  $\psi_{сус}^{сгс}$  дозволяє враховувати малоциклове прикладання навантаження (рис. 2, б) із задовільною ступінню кореляції.

На основі виконаних досліджень пропонується ширину розкриття нормальних тріщин  $a_{cr}$  в залізобетонних попередньо напружених елементах, що зазнають дії малоциклових навантажень і проектується за категорією тріщиностійкості 2б визначати за формулою:

$$a_{cr} = \psi_{сус}^{сгс} \frac{\sigma}{E} \leq \Delta_{cr}, \quad (3)$$

де  $\psi_{сус}^{сгс}$  - коефіцієнт, який враховує характер навантаження: при

одноразовому навантаженні приймається  $\psi_{сус}^{сгс} = 1,00$ ; при

повторних короткочасних малоциклових навантаженнях, рівень

яких становить 60% від руйнівного,  $\psi_{сус}^{сгс} = 1,41$ ; якщо рівень

становить 75% від руйнівного, то  $\psi_{сус}^{сгс} = 1,59$ .

При порівнянні теоретичних та експериментальних значень ширини розкриття тріщини середнє відношення  $k_m = a_{сгс}^{теор} / a_{сгс}^{exp}$  для всіх балок на шостому циклі перед довантаженням склало  $k_m = 1,31$  при середньоквадратичному відхиленні  $\sigma = 0,575$  та коефіцієнті мінливості  $v = 0,203$ , на десятому циклі після перевантаження -  $k_m = 1,11$  при середньоквадратичному відхиленні  $\sigma = 0,226$  при коефіцієнті мінливості  $v = 0,373$ . При ймовірності 0,90 довірчий інтервал складає  $0,92 \leq k \leq 1,61$  в першому випадку та  $0,96 \leq k \leq 1,26$  в другому.

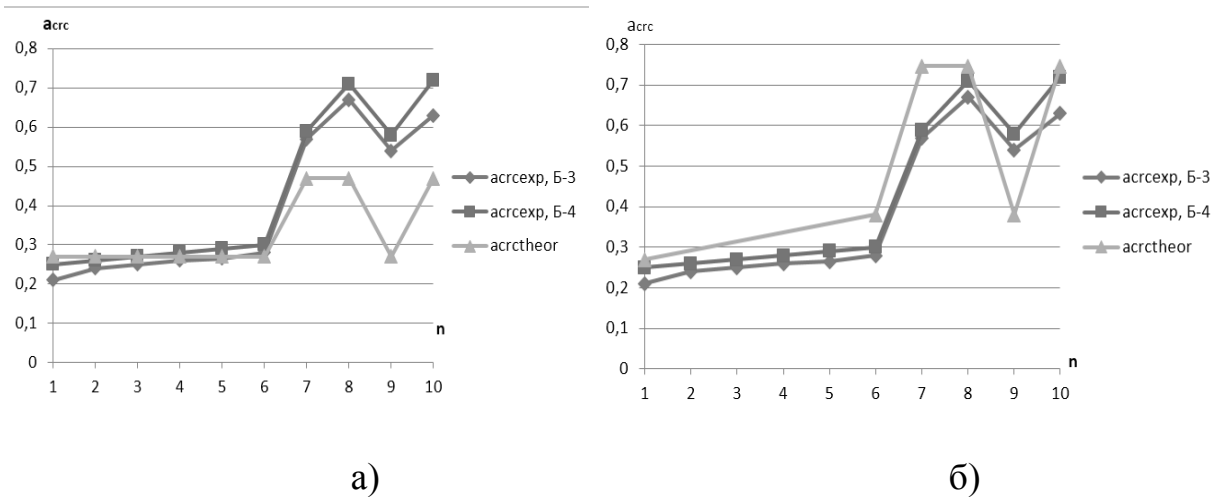


Рис. 2. Максимальна ширина розкриття тріщин балок по циклах (а – визначення  $a_{сгс}^{теор}$  згідно ДБН [3]; б - визначення  $a_{сгс}^{теор}$  за формулою 2 з врахуванням  $\psi_{сус}^{сгс}$ ;  $a_{сгс}^{exp}$  – отримані експериментально)

Дані виконаних експериментальних досліджень показують, що при малоциклових навантаженнях високого рівня прогини згинаних попередньо напружених балок збільшуються. Тому формулу (3.12) необхідно ввести

коефіцієнт  $\psi_{\text{сус}}^f$ , який враховує збільшення прогинів балок при малоциклових навантаженнях. Він прийнятий згідно результатів випробувань дослідних зразків, його величини для різних рівнів навантаження приведені в табл. 2.

Таблиця 2.

Значення коефіцієнта  $\psi_{\text{сус}}^f$  при розрахунку прогинів

Коефіцієнт	Рівень навантаження 0,6 P <sub>cr</sub>	Рівень навантаження 0,75 P <sub>cr</sub>
$\psi_{\text{сус}}^f$	1,12	1,67

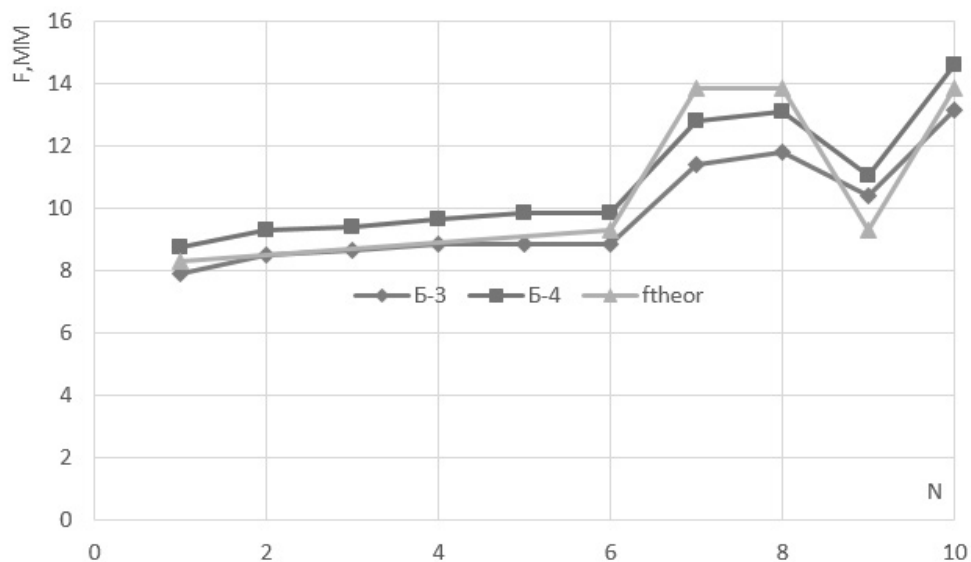


Рис. 3. Максимальні прогини балок Б-3 і Б-4 по циклах та теоретичні прогини  $f_{\text{theor}}$ , визначені за формулою 4

На основі виконаних досліджень пропонується прогини  $f$  залізобетонних попередньо напружених елементів, які зазнають дії малоциклових навантажень, визначати за формулою :

$$f = \psi_{\text{сус}}^f \sum \bar{M}(x) \frac{1}{\rho}(x) \Delta x, \quad (4)$$

де  $\psi_{\text{сус}}^f$  – коефіцієнт, який враховує характер навантаження : при одноразовому навантаженні приймається  $\psi_{\text{сус}}^f = 1,0$ ; при малоциклових



навантаженнях, рівень яких становить 60% від руйнівного  $\psi_{суч}^f = 1,12$ ; якщо рівень становить 75% від руйнівного  $\psi_{суч}^f = 1,67$ .

Всі балки витримали базу випробувань  $N$ , після чого при визначенні руйнівного зусилля  $P_{cr}$  всі руйнувались по нормальних перерізах внаслідок руйнування бетону стиснутої зони. Характер руйнування при малоциклових навантаженнях аналогічний характеру при одноразових навантаженнях балок цієї ж серії.

Для перевірки запропонованої формули використаємо дані роботи [14] Стояновича С.В. отримані при випробуванні збірної залізобетонної попередньо напруженої балки «ЗВет-120» (рис. 4). Програма випробування включала в себе 5 циклів привантаження до рівнів 0,94 та один 0,98  $P_{cr}$  (розрахункового, при досягненні якого балка не руйнувалась).

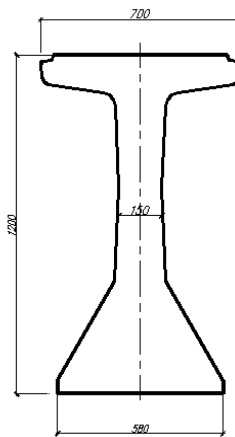


Рис. 4. Переріз збірної балки «ЗВет-120»

Згідно норм [3] розраховано ширину розкриття тріщини цієї балки при даних рівнях завантаження (рис. 5). При розрахунку ширини розкриття тріщини при навантаженні 0,98  $P_{cr}$  використаний коефіцієнт  $\psi_{суч}^{срн} = 1,59$  (для рівня 0,75  $P_{cr}$ ). Таким чином розрахункове значення ширини розкриття тріщин майже співпадає з фактичним експериментальним, різниця на 5 циклі становить 5,56%, на 6 циклі 4,82%.

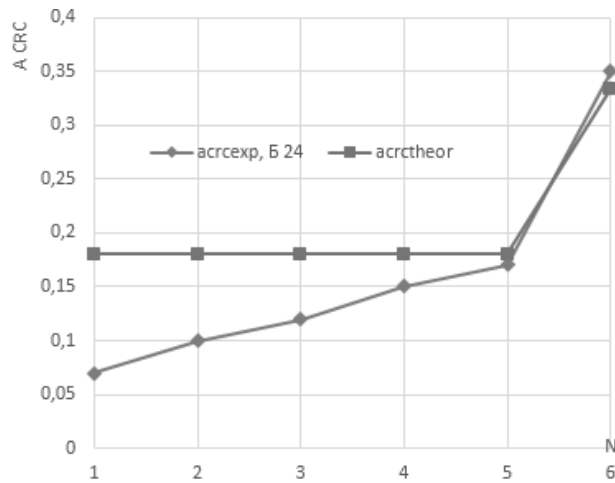


Рис. 5. Ширина розкриття тріщин балки 3-Бет довжиною 24м при малоциклових навантаженнях :  $a_{crc}^{exp}$  – отримана експериментально;  $a_{crc}^{theor}$  – отримана теоретично з використанням формули 2.

*Висновок:*

Експериментально встановлено збільшення ширини розкриття тріщин при малоцикловому випробуванні залізобетонних балок зі змішаним армуванням. При 7 циклах завантаження до рівня  $0,6P_{cr}$  максимальна ширина розкриття тріщин збільшилась на 40,67%, а прогини на 12%; при навантаженні до рівня  $0,75 P_{cr}$  при 10 циклах, максимальна ширина розкриття збільшилась на 58,83%, а прогини на 67%. Виведені коефіцієнти для розрахунку ширини розкриття тріщин при дії малоциклових навантажень рівнів  $0,6 P_{cr}$  та  $0,75 P_{cr}$  можна використовувати для натурних балок мостів.

**Література**

1. Державні будівельні норми України. Мости та труби. Правила проектування. (ДБН В.2.3-14:2006) – Держбуд України, 2006. – 356с.
2. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. ДБН В.1.2 – 15:2009.-56с.
3. Мости та труби. Основні вимоги проектування [Текст] : ДБН В.2.3-22:2009. – Чинні від 2009-11-11. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 73 с.
4. В.П. Еремеев, Й. Звара, Общие проблемы эксплуатации мостов, Автомобильные дороги, №2 1984.
5. Бабич Є.М., Панчук Ю.М. Робота залізобетонних балок зі змішаним армуванням за малоциклових навантажень високих рівнів // Проблеми теорії і практики залізобетону: Зб. наук. статей: - Полтава, 1997. - С. 30-32.

6. Бабич Є.М., Ю.О. Крусь, Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень. Монографія. - Рівне, видавництво РДТУ, 1999.-119с.
7. Валовой А.И. Образование и раскрытие трещин в преднапряженных элементах при повторном нагружении // Бетон и железобетон. – 1988. - №12. – с. 6-7.
8. Валовой А.И. Работа преднапряженных плит при малоцикловом нагружении // Бетон и железобетон. – 1989. - №6. – С. 10-11.
9. Полюга Р.І. Тріщиностійкість залізобетонних балочних конструкцій автодорожніх мостів в умовах малоциклових навантажень: дис.. канд. наук Полюга Роман Ігорович. – Львів, НУ «Львівська політехніка», 2006. - 160с.
10. Бабич В. Є. Напружено-деформований стан і міцність нерозрізних залізобетонних балок при одноразових та повторних навантаженнях [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бабич Володимир Євгенович – Полтава, 2005. – 20 с.
11. Барашиков А. Я. Малоцикловая усталость бетона при сжатии / Барашиков А. Я., Шевченко Б. Н., Валовой А. И. // Бетон и железобетон. – 1985. – № 4. – С. 27-28.
12. Напряженное состояние преднапряженных балок при высоких уровнях повторного нагружения [Текст] / Шевченко Б. Н., Хусанов Э., Тарик К. Ю., Шевченко С. Б. // Бетон и железобетон. – 1991. – № 1. – С. 11-13.
13. Погореляк А. П. Исследование работы железобетонных изгибаемых элементов на поперечную силу при многократно повторных нагружениях [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Погореляк А. П. – Ровно, 1981. – 174с.
14. Стоянович С. В. Напружено-деформований стан збірно-монолітних попередньо напружених залізобетонних прогонових будов мостів [Текст] : дис. ... канд техн. наук : 05.23.01 / Стоянович Сергій Вікторович. – К., 2013. – 197 с.