

Міністерство освіти і науки України  
Національний авіаційний університет

**Ковальчик Ярослав Ігорович**

УДК 624.016:624.072.2

**МІЦНІСТЬ, ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ  
ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ БАЛКОВИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ  
ПРОГОНОВИХ БУДОВ МОСТІВ**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2015



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному транспортному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, професор  
**Коваль Петро Миколайович**,  
Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури Міністерства культури України, завідувач кафедри архітектурних конструкцій

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент  
**Єрмоленко Дмитро Адольфович**  
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України, професор кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою, та сільських будівель

кандидат технічних наук, доцент  
**Сало Володимир Юрійович**  
Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри мостів та будівельної механіки

Захист відбудеться « \_ » \_\_\_\_\_ 2015 р. о \_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.062.12 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, Україна, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корп. 5, ауд. 303.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університеті за адресою: 03058, Україна, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради,

кандидат технічних наук, с.н.с., доцент

 Д. Е. Прусов



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Досвід експлуатації мостів у ХХ столітті показав, що збірні залізобетонні прогонові будови мають недостатню довговічність. Зростання маси транспортних засобів та збільшення їх інтенсивності руху викликає потребу зводити мости із високоміцних матеріалів та надійних конструкцій.

Саме тому в Україні з 2000-х років залізобетонні прогонові будови мостів переважно будують із монолітного або збірно-монолітного попередньо напруженого залізобетону. Це дозволяє підвищити експлуатаційну надійність транспортних споруд, збільшити їх довговічність. Об'єднання залізобетонних балок монолітною плитою змінює стадійність та принципи роботи попередньо напружених балок в порівнянні зі збірною конструкцією прогонової будови без монолітної об'єднуючої плити. Використання нових видів високоміцної попередньо напруженої арматури, бетонів високого класу за міцністю, створення конструкцій прогонових будов нових типів вимагає експериментально-теоретичного вивчення сучасних залізобетонних попередньо-напружених елементів і споруд транспортного будівництва.

Застосування монолітних попередньо напружених прогонових будов з натягом на бетон (пост-напружені системи) є новітнім для України. Вони мають багато переваг у порівнянні зі збірним попередньо напруженим залізобетоном. Але необхідно вирішити ще ряд проблем при проектуванні та зведенні таких споруд для досягнення ефективності конструкцій, які б прослужили запроектований термін, використовуючи всі свої переваги.

Відомо, що на прогонові будови мостів діють циклічні навантаження. Варто відмітити, що робота попередньо напружених конструкцій мостів при дії малоциклових навантажень високого рівня та багатоциклових навантажень експлуатаційного рівня досліджена недостатньо. Враховуючи особливості сучасних прогонових будов, це є актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась згідно плану науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт Державної служби автомобільних доріг України (Укравтодор) в рамках держбюджетної теми з державним реєстраційним номером 0112U004898 «Виконати аналіз, дослідження та розробити рекомендації з проектування монолітних попередньо-напружених мостів з напруженням на бетон (пост-напружені системи)» Державного дорожнього науково-дослідного інституту ім. М.П. Шульгіна (здобувач – відповідальний виконавець роботи) та в рамках договору ДП «Держдор НДІ» № 298-10 з КП «Дирекція будівництва шляхово-транспортних споруд міста Києва» «Обстеження і випробування естакади вздовж вулиці Набережно-Хрещатицька в м. Києві в складі будівництва Подільського мостового переходу через р. Дніпро в м. Києві».

**Мета роботи** – розробити рекомендації з розрахунку та проектування залізобетонних попередньо напружених прогонових будов мостів з врахуванням дії циклічних навантажень при експлуатації та впливу термонапруженого стану при їх влаштуванні.

### **Задачі дослідження :**

- дослідити міцність, тріщиностійкість та деформативність залізобетонних попередньо напружених балок із канатною арматурою європейського типу при дії одноразових та малоциклових навантажень;
- дослідити витривалість залізобетонних попередньо напружених балок із канатною арматурою європейського типу;
- розробити рекомендації з розрахунку залізобетонних попередньо напружених балкових конструкцій із врахуванням дії циклічних навантажень;
- дослідити вплив термонапруженого стану при влаштуванні монолітних залізобетонних попередньо напружених прогонових будов мостів на їх тріщиностійкість;
- встановити можливість застосування методу цифрової кореляції зображень для дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій;
- дослідити вплив транспортних засобів на експлуатаційний стан залізобетонних прогонових будов мостів різних типів і розробити пропозиції щодо використання найбільш ефективних прогонових будов за критерієм тріщиностійкості.

**Об'єктом дослідження** є робота залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів під дією навантажень.

**Предметом дослідження** є міцність, тріщиностійкість, деформативність попередньо напружених балкових залізобетонних прогонових будов мостів при дії одноразових та циклічних навантажень.

**Методи дослідження.** Випробування бетонних і залізобетонних елементів виконані згідно діючих норм із застосуванням як традиційних тензометричних методів, так і сучасних методів акустичної емісії (АЕ) та цифрової кореляції зображень (ЦКЗ), з використанням програмних комплексів «НВМ» та «АКЕМ». Теоретичні методи досліджень базуються на методі розрахунку залізобетонних конструкцій за граничними станами та деформаційній моделі, методі скінчених елементів, реалізованих у ПК «ЛИРА САПР», «MIDAS», «MathCad».

### **Наукова новизна роботи:**

- вперше отримані експериментальні дані міцності, тріщиностійкості та деформативності залізобетонних попередньо напружених балок із канатною арматурою європейського типу при дії одноразових та малоциклових навантажень;
- вперше експериментально визначена витривалість залізобетонних попередньо напружених балок із канатною арматурою європейського типу;
- вперше розроблено рекомендації щодо використання на автомобільних дорогах з високою інтенсивністю руху ефективних прогонових будов за критерієм тріщиностійкості;
- отримано нові дані про вплив термонапруженого стану при влаштуванні монолітних залізобетонних попередньо напружених прогонових будов мостів на їх тріщиностійкість;
- знайшов подальший розвиток розрахунків залізобетонних попередньо напружених балкових конструкцій із врахуванням дії циклічних навантажень;
- знайшло подальший розвиток використання методу цифрової кореляції зображень для аналізу напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій.

**Практична цінність роботи.** Результати дисертаційної роботи використані у «Рекомендаціях з проектування монолітних попередньо напружених мостів з напруженням на бетон (пост-напружені системи)», розроблених ДП «Держдор НДІ». Врахування при розрахунках попередньо напружених залізобетонних прогонових будов впливу циклічних навантажень, термонапруженого стану при їх влаштуванні за рекомендаціями даної роботи дозволить підвищити надійність та довговічність мостів.

**Впровадження результатів роботи.** Результати дисертаційної роботи використані ДП «Держдор НДІ» при розробці нових залізобетонних балок типу Б (1500-3300).(100-120).40 і МЗБК-160 та проектним інститутом Київсоюзшляхпроект при проектуванні монолітної попередньо-напруженої прогонової будови для будівництва транспортної розв'язки в різних рівнях на км 304+440 автомобільної дороги Київ-Харків-Довжанський. Також результати досліджень впроваджені в навчальний процес кафедри «Архітектурні конструкції» в Національній академії образотворчого мистецтва і архітектури.

#### **Особистий внесок здобувача.**

Результати наукових досліджень, що представлені у роботі, отримані автором самостійно та виносяться до захисту вперше. У наукових працях, що опубліковані в співавторстві, здобувачеві належить: [1, 2, 3, 11, 12] обстеження, випробування, аналіз результатів дослідження та розрахунки монолітної попередньо напруженої естакади, [11, 14, 16] – визначення термонапруженого стану та його впливу на утворення тріщин при зведенні монолітних попередньо напружених прогонових будов, [8, 9, 10, 13] – комплексні дослідження роботи попередньо напружених залізобетонних балок при дії одноразового та малоциклового навантаження та аналіз їх роботи, [6, 7] – випробування та аналіз результатів досліджень нових попередньо напружених мостових балок, [4, 5, 6, 8, 13] – застосування та аналіз результатів досліджень залізобетонних конструкцій з використанням методу цифрової кореляції зображень, [1, 9, 13, 15] – використання методу акустичної емісії для дослідження бетонних та попередньо напружених залізобетонних конструкцій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на таких конференціях: VII науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (Рівне, НУВГП, 2011), II Міжнародній науково-технічній конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (Дніпропетровськ, ДНУЗТ, 2012), Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні методи і технології проектування, будівництва та експлуатації інженерних споруд на автомобільних дорогах» (Київ, НТУ, 2013), XIV і XVI Міжнародній науковій конференції «Актуальні проблеми будівництва та інженерії довкілля» (м. Львів, НУ «Львівська політехніка», 2013, 2015), III міжнародної науково-технічної конференції «Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей» (м. Луцьк, НЛТУ, 2014), 16-й та 17-й конференції молодих вчених «Наука – будуще Литвы» (Вільнюс, Вільнюський технічний університет ім. Гедімінаса, 2014, 2015).

В повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на розширеному засіданні кафедри дорожньо-будівельних матеріалів та хімії в НТУ (Київ, 2015).

**Публікації.** Усього по темі дисертації опубліковано 16 публікацій, в тому числі 11 у виданнях, що входять до переліку спеціалізованих фахових видань ДАК України та 3 у закордонних виданнях.

**Структура і обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел та 2 додатків, і має 140 сторінок основного тексту, 123 рисунки, 26 таблиць, 22 сторінки додатків, список використаних джерел з 191 найменування. Загальний обсяг роботи 224 сторінки.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подана загальна характеристика дисертації, обґрунтована актуальність роботи, викладені мета та задачі досліджень, наукова новизна та практична цінність роботи.

У **першому розділі** проведений аналіз розвитку попередньо напружених прогонових будов та їх конструктивно-технологічні рішення в Україні. Вони є перспективними конструкціями транспортних споруд, але ряд особливостей їх роботи недостатньо досліджені.

Дослідженням напружено-деформованого стану попередньо-напружених залізобетонних конструкцій займались Азізов Т.Н., Бамбура А.М., Барашиков А.Я., Бліхарський З.Я., Гибшман Е.Е., Гибшман М.Е., Гнідець Б.Г., Голишев А.Б., Давиденко О.І., Демчина Б.Г., Дорофєєв В.С., Кваша В.Г., Клименко Є.В., Клімов Ю.А., Кривошеєв П.І., Семко О.В., Стороженко Л.І., Сало В.Ю. та інші.

В збірно-монолітних прогонових будовах сучасних мостів України використовується канатна арматура європейського типу з натягом на упори, в монолітних – з натягом на бетон. Конструкції з таким армуванням вимагають експериментальних досліджень, особливо при роботі на циклічні навантаження.

Роботу згинаних залізобетонних елементів при дії малоциклових навантажень досліджували Бабиш Є. М., Барашиков А. Я., Берг О. Я., Бондаренко В. М., Валовой О. І., Клименко Є. В., Крусь Ю. О. та інші. В роботах Ковалю П. М. і Полюги Р. І. було встановлено значний вплив малоциклових навантажень високого рівня на напружено-деформований стан балок прогонових будов мостів із звичайного залізобетону.

Вивчали НДС згинаних залізобетонних елементів при дії багатоциклових навантажень Коссовський Г.Д., Левчич В.В., Мельник І.В., Кваша В.Г., Кінаш Р.І. та інші.

Розглянута проблема термонапруженого стану та тріщиноутворення в масивах монолітних залізобетонних прогонових будов мостів при їх зведенні, яке впливає на забезпечення надійності та довговічності їх експлуатації.

Встановлено, що поряд з традиційними методами визначення НДС будівельних конструкцій розповсюдження дістав метод акустичної емісії. Традиційні методи НК не можуть в повній мірі оцінити ступінь небезпеки дефекту для конструкції на відміну від методу АЕ, що дозволяє знайти дефект, оцінити небезпеку, швидкість його росту і прогнозувати його розвиток та руйнування, що наближається. Перспективним напрямком є використання методу цифрової кореляції зображень для



визначення НДС будівельних конструкцій, тому доцільно провести дослідження та порівняти його результати із традиційними методами та методом АЕ.

З огляду на вищенаведене сформульовані мета досліджень та задачі для її досягнення.

У **другому розділі** наведені програма і методика, аналіз та план експериментальних досліджень попередньо напружених лабораторних та натурних залізобетонних попередньо напружених балок (табл. 1, рис. 1). Випробовувались лабораторні зразки балок, армовані канатами К-7, розробленими згідно європейських норм EN 10138-3, при дії одноразових, малоциклових та багатоциклових навантажень за схемою чистого згину. Для визначення механічних характеристики бетону випробовувались куби та призми згідно норм. При дослідженні бетонних зразків використовувалось тепловізійне обладнання для фіксації процесів виділення тепла (енергії руйнування) при деформуванні та руйнуванні масиву бетону. При випробуванні балок застосовувались механічні прилади, тензометрія, мікроскопія, методи акустичної емісії та цифрової кореляції зображень.

Для випробування на малоциклові навантаження високого рівня базою випробувань було прийнято  $N = 10$  циклів. В попередніх дослідах на балках-близнюках при одноразовому завантаженні були визначені значення руйнівного навантаження  $P_{cr}$ . Базовим рівнем, до якого навантажувались зразки, прийнято  $0,6P_{cr}$ . Для того, щоб моделювати довантаження конструкції до вищого рівня, після перших шести циклів з максимальним рівнем навантаження  $0,6P_{cr}$ , на сьомому і восьмому циклі рівень навантаження був доведений до  $0,75P_{cr}$ . Дев'ятий цикл був проведений з максимальним рівнем навантаження  $0,6P_{cr}$ , десятий – знову до  $0,75P_{cr}$ . Після бази випробувань балки були доведені до руйнування одноразовим прикладенням зусилля з фіксацією руйнівного навантаження. Балки випробовувались на стаціонарному стенді (рис. 2).

Базою випробувань при багатоциклових випробуваннях було прийнято  $N = 2 \times 10^6$  циклів. Випробовувались 3 серії дослідних зразків по 2 балки-близнюки з різними характеристиками навантаження на гідравлічному пульсаторі EUS-20.

Були розроблені нові залізобетонні балки типу Б(1500-3300).(100-120).40, прогонами 15,18, 21, 24 та 33 м, які розраховані на сучасні навантаження відповідно до вимог норм. Розроблено універсальний стенд, який використовується як для виготовлення балок, так і для їх випробування. В опалубці стенду можна виготовляти балки різної довжини включно до 33 м. За допомогою вкладишів, які встановлюються в нижню зону опалубки, її конструкція дозволяє отримувати балки різної висоти: 1,0, 1,1, 1,2 м. Випробовувались дві балки довжиною 18 м та 21 м на дію згинального моменту поперечної сили.

Розробка конструкції балки «МЗБК-160» проводилася на основі розрахунків, виконаних в інституті ДП «Держдор НДІ». Проведені натурні випробування для оцінки несної здатності, жорсткості та тріщиностійкості збірної попередньо напруженої балки довжиною 33 м та досліджено її напружено-деформований стану на всіх стадіях роботи традиційними методами та методом ЦКЗ.

У **третьому розділі** висвітлені результати досліджень лабораторних попередньо напружених залізобетонних балок при випробуванні на одноразові, малоциклові і

## Програма та обсяг експериментальних досліджень

Тип зразка	Серія бетону	Маркування	Кількість зразків	Спосіб випробування	Методи досліджень
Бетонні куби 100×100×100	КБ-1	К	7	Одноразовий стиск $\eta = 0...1$	Акустична емісія, тепловізор, ЦКЗ
Бетонні призми 100×100×400		ПР	3	Одноразовий стиск $\eta = 0...1$	Акустична емісія, індикатори на базах
Залізобетонні балки (лабораторні зразки)		Б-1 Б-2	2	Одноразові навантаження $\eta = 0...1$	Тензометрія, мікроскопія, акустична емісія, цифрова кореляція зображень
		Б-3 Б-4	2	Малоциклові навантаження $N=10, \eta_{\text{сус}}^{\text{low}} = 0$ $\eta_{\text{сус}}^{\text{top}} = 0.60/0.75$	
	Б-5, Б-6 Б-7, Б-8 Б-9, Б-10	6	Багатоциклові навантаження (змінні $\rho, \gamma$ )	Мікроскопія, тензометрія, ЦКЗ	
Залізобетонні балки (натурні зразки)	Б 1800.110.40	1	Одноразові навантаження $\eta = 0...1$	Механічні прилади	
	Б 2100.110.40	1			
	МЗБК-160	1		Механічні прилади, АЕ, тензометрія, ЦКЗ	

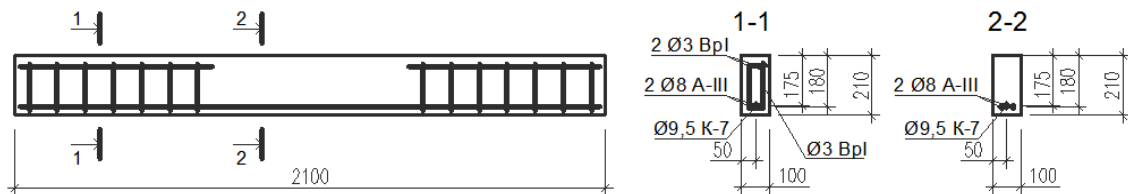


Рис. 1. Конструкція дослідних балок (лабораторні зразки)

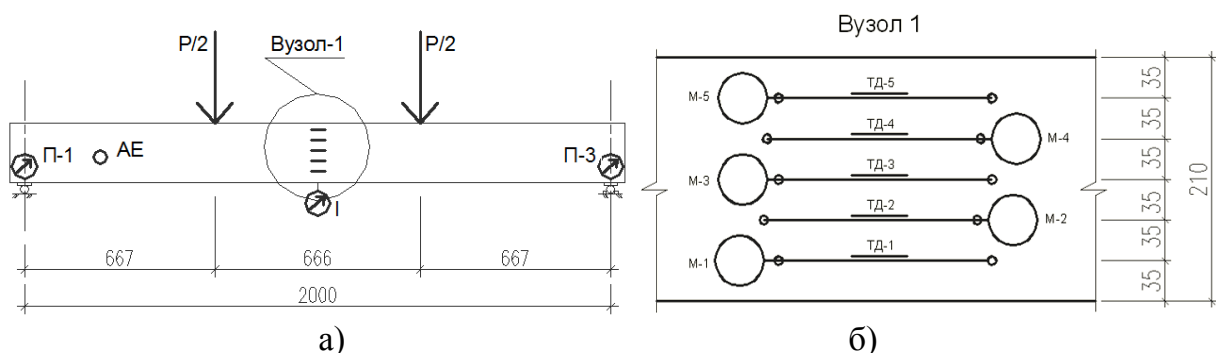


Рис. 2. Схема прикладання навантажень та розташування приладів при випробуванні дослідних зразків балок на одноразові та малоциклові навантаження (а); схема розташування індикаторів на базах та тензодатчиків на гранях балок (б)

багатоциклові навантаження та натурних попередньо напружених залізобетонних балок.

При одноразових навантаженнях балок досліджено їх НДС та показано хорошу збіжність деформацій, заміряних традиційними методами та ЦКЗ (рис. 3, 4).

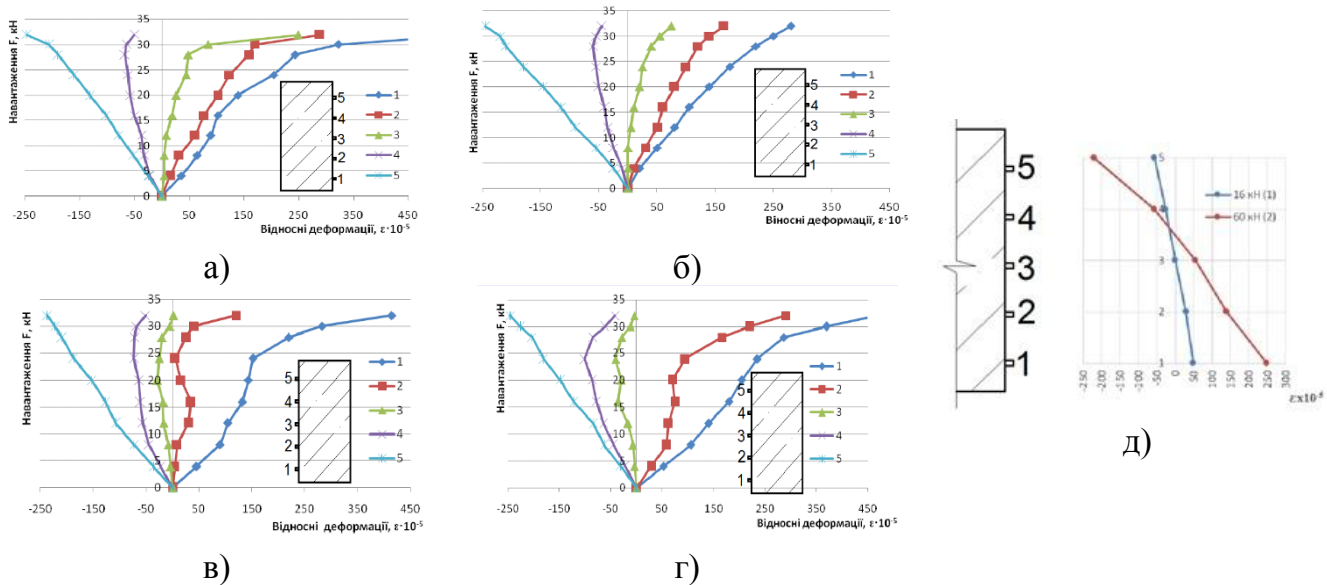


Рис. 3. Відносні деформації за показами: а – тензодатчиків, б – мікроіндикаторів, в – екстензометрів ЦКЗ навпроти тензодатчиків, г – екстензометрів ЦКЗ навпроти мікроіндикаторів, д – по висоті балки при навантаженні 16 кН (1) і 60 кН (2)

На рис. 4 представлені зони відносних деформацій при різних рівнях завантаження балок, зафіксовані методом ЦКЗ. На рисунку чітко зафіксована розтягнута і стиснута зони балки, місця утворення тріщин. Експериментально встановлено, що метод ЦКЗ дає можливість фіксувати напружено-деформований стан попередньо напружених елементів. Дані про тріщиностійкість, відносні деформації і прогини, отримані методом ЦКЗ, корелюються з традиційними методами (індикаторами на базі, прогиномірами), тензOMETричним і методом АЕ.

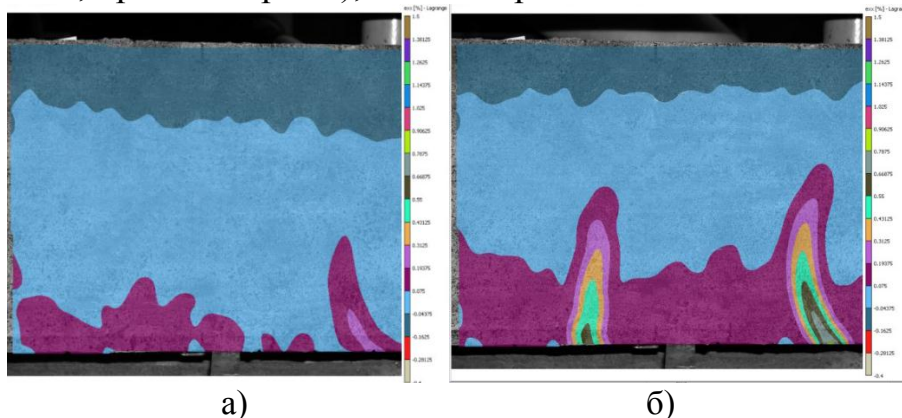


Рис. 4. Відносні деформації зафіксовані методом ЦКЗ в середній зоні балки Б-2 при навантаженні: а – 16 кН, б – 32 кН

Балки Б-3 і Б-4 витримали базу малоциклових навантажень згідно програми випробувань, після чого вони були доведені до руйнування по нормальних перерізах внаслідок руйнування бетону стиснутої зони. Після прикладання малоциклових навантажень їх несна здатність за згинальним моментом зменшилась на 5% (табл. 2).

Результати досліджень показують, що при циклічному навантаженні балок до рівня  $0,6P_{cr}$  максимальна ширина розкриття тріщин збільшилась у порівнянні з одноразовим навантаженням балок Б-1 і Б-2 в середньому на 41%, тому коефіцієнт прийнято  $\psi^{crc} = 1,41$ . Після циклічних довантажень до рівня  $0,75P_{cr}$  ширина розкриття тріщин зросла на 59% у порівнянні із шириною розкриття тріщин базових зразків, тому для такого рівня малоциклових навантажень  $\psi_{cyc}^{crc} = 1,59$ .

Таблиця 2

Моменти руйнування для залізобетонних балок при одноразових і малоциклових навантаженнях

Шифр балок	Згинальний момент руйнування						Зменшення несної здатності за згинальним моментом
	Розрахунковий $M_{cr}$ [ДБН В.2.3-22:2009], кНм	Розрахунковий за ПК «ЛІРА САПР» $M_{cr2}$ , кНм	Одноразовий $M_{cr}$ , кНм	$M_{cr,сеп}$ , кНм	Малоцикловий $M_{cr}^{cyc}$ , кН	$M_{cr,сеп}^{cyc}$ , кНм	
Б-1	23,03	23,33	23,66	23,75			$(M_{cr,сеп} - M_{cr,сеп}^{cyc}) \times 100\% / M_{cr,сеп}$
Б-2			23,83				
Б-3				23,66	23,50		
Б-4				23,33			

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:

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

де  $\psi_{cyc}^{crc}$  – коефіцієнт, який враховує характер навантаження: при одноразовому навантаженні приймається  $\psi_{cyc}^{crc} = 1,00$ ; при повторних короткочасних малоциклових навантаженнях, рівень яких становить 60% від руйнівного,  $\psi_{cyc}^{crc} = 1,41$ ; якщо рівень становить 75% від руйнівного, то  $\psi_{cyc}^{crc} = 1,59$ .

Аналогічно виконано аналіз прогинів дослідних балок. Результати дослідження показали, що при малоциклових навантаженні балок до рівня  $0,6P_{cr}$  прогини збільшились в середньому на 12% в порівнянні з прогинами базових дослідних зразків – балок Б-1, Б-2. Після циклічних навантажень до рівня  $0,75P_{cr}$  прогини балок зросли на 67% у порівнянні із прогинами базових зразків.

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

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

де  $\psi_{cyc}^f$  – коефіцієнт, який враховує характер навантаження : при одноразовому навантаженні приймається  $\psi_{cyc}^f = 1,00$ ; при малоциклових навантаженнях, рівень яких становить 60% від руйнівного  $\psi_{cyc}^f = 1,12$ ; якщо рівень становить 75% від руйнівного  $\psi_{cyc}^f = 1,67$ .

Порівняння розрахункових даних ширини розкриття тріщин і прогинів, отриманих за формулами (1) і (2) з експериментальними результатами, отриманими при випробуваннях балок Б-3 і Б-4 показує їх задовільну збіжність (рис. 5).

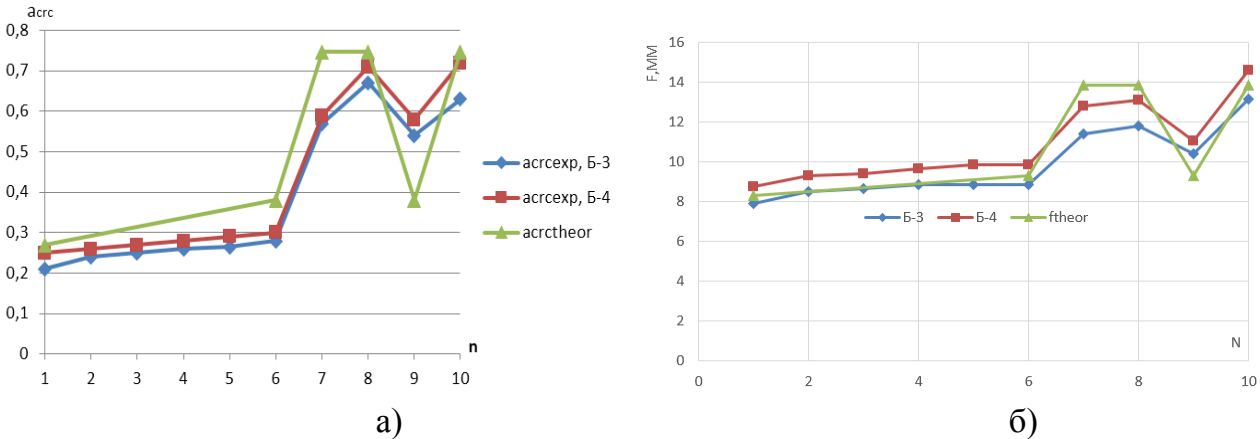


Рис. 5. Максимальна ширина розкриття тріщин балок по циклах (а); максимальні прогини балок по циклах (б)

Оцінку небезпеки процесів тріщиноутворення в залізобетонних конструкціях при малоциклових навантаженнях виконано з використанням методу АЕ за методикою Філоненка С.Ф. Для циклів привантажень балок Б-3 і Б-4 визначені коефіцієнти  $b$  у формулах (3), (4) для визначення кінетики розвитку тріщин при пікових навантаженнях на циклах привантажень (табл. 3).

$$\bar{N}_H = a_1 \bar{P}^{b_1}, \quad (3)$$

$$\bar{E}_H = a_2 \bar{P}^{b_2}, \quad (4)$$

де  $\bar{N}_H$  – кількість сигналів АЕ;  $\bar{E}_H$  – енергія сигналів АЕ;  $a, b$  – константи.

Про небезпеку процесів, що відбуваються в структурі матеріалів свідчить значення показників степені  $b$ . Значення  $b > 3$  свідчить про небезпечний розвиток тріщин, за цим показником можна прогнозувати малоциклову втомленість бетону конструкцій.

Таблиця 3

Коефіцієнт  $b$  при малоциклових випробуваннях

Балки	Коефіцієнт $b$		
	Цикли 1-6 ( $0,6P_{cr}$ )	Цикл 7 ( $0,75P_{cr}$ )	Цикли 8-10 ( $0,75P_{cr}$ )
Б-3	-0,2...-1,59	7,09	-10,04...29,72
Б-4	-1,28...-2,35	5,90	-3,13...31,7

Небезпечні тріщини утворюються в балках Б-3, Б-4 на 7 циклі при збільшенні циклічних навантажень від  $0,6P_{cr}$  до  $0,75P_{cr}$  ( $b = 5,9; 7,09$ ), а також при збільшенні навантажень на 10 циклі перед руйнуванням балок, при цьому фіксувалось різке збільшення коефіцієнтів  $b$ .

Аналізуючи значення коефіцієнта  $b$  ми можемо визначити, при якому рівні малоциклових навантажень тріщини будуть розвиватися, що викличе зниження довговічності конструкції. В реальних умовах при випробуванні залізобетонної конструкції прогонової будови без відомостей про історію її перевантажень можна аналогічним способом визначити ймовірність утворення та розвитку тріщин, які приведуть до втрати експлуатаційного стану моста.

Згідно норм ДБН В.2.3 – 14:2006 проведений розрахунок дослідних балок на витривалість (табл. 4, 5). Балки Б-5, Б-6, Б-7, Б-8 витримали 2 млн. циклів навантажень і зруйновані статичним навантаженням із руйнуванням бетону в стиснутій зоні. Згідно даних табл. 5 балки Б-7, Б-8 мають запас по міцності на витривалість по бетону стиснутої зони, тому що витримали базу випробувань, хоча за розрахунком вони повинні зруйнуватись.

Таблиця 4

## Перевірка витривалості по попередньо напруженій арматурі

	$\sigma_{p,max}$ , кН/см <sup>2</sup>	$m_{ар1} - R_p$ , кН/см <sup>2</sup>	Висновок
Б-5, Б-6	1042,67	1200	Умова виконується
Б-7, Б-8	1090,37	1200	Умова виконується
Б-9, Б-10	1110,20	1200	Умова виконується

Таблиця 5

## Перевірка витривалості бетону стиснутої зони

№	$\sigma_{bc,max}$ , МПа	$m_{б1} - R_b$ , МПа	Висновок
Б-5, Б-6	19,93	19,22	Умова виконується
Б-7, Б-8	25,31	19,22	Умова не виконується
Б-9, Б-10	27,55	19,22	Умова не виконується

Балки Б-9, Б-10 зруйнувались після 700 тис. циклів навантажень по бетону стиснутої зони, що і передбачалось розрахунком.

Багатократне прикладення навантаження збільшує початкові прогини на робочих рівнях навантажень. При першому режимі завантаження для балок Б-5, Б-6 загальне середнє збільшення максимальних прогинів становило 26%, для балок Б-7, Б-8 – 28%, для балок Б-9, Б-10 – 29%. Прогини балок стабілізувались після 800 тис. циклів.

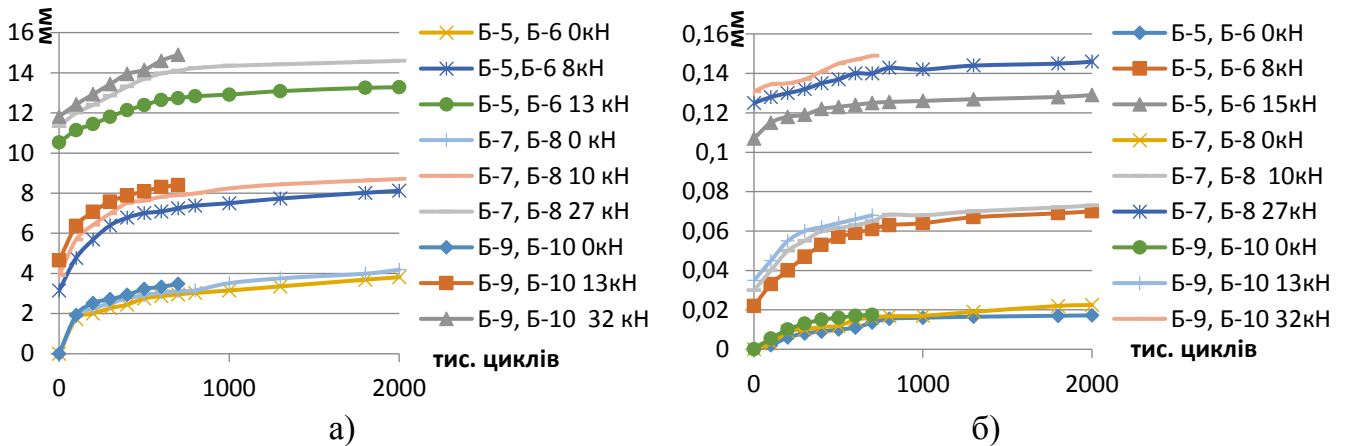


Рис. 6. Середні прогини пар балок при робочих рівнях навантаження (а), середнє розкриття максимальної тріщини пар балок при робочих рівнях навантаження (б)

При випробуванні балок Б1800.110.50 і Б2100.110.50 на дію згинального моменту обидві балки зруйнувались по бетону стиснутої зони при навантаженні відповідно 546,0 кН і 475,6 кН, що вище відповідних значень контрольних навантажень. При випробуванні на дію поперечної сили при досягненні навантажень 1070 кН і 1150 кН, що більше відповідних контрольних значень навантажень, обидві балки не зруйнувались.

При випробуванні на згинальний момент при контрольному навантаженні 463 кН в балці Б1800.110.50 тріщини не утворились, а в балці Б2100.110.50 при контрольному навантаженні 398,98 кН ширина розкриття тріщин становила 0,05 мм, що менше контрольного значення 0,15 мм. При випробуванні на поперечні силу при контрольних навантаженнях 1064 та 1144 кН у обох балках тріщини були відсутні.

Жорсткість обох балок достатня для сприйняття розрахункових навантажень, фактичні прогини при контрольних навантаженнях 20 і 12 мм були меншими від контрольних значень (43 і 35 мм).

При випробуванні балки МЗБК-160 на дію згинального моменту вона зруйнувалась по стиснутій зоні бетону з роздробленням верхньої полицки при навантаженні 786,5 кН, що більше розрахункового навантаження 741,8 кН на 6%.

Балка має певні запаси по жорсткості: прогин при контрольному навантаженні при випробуванні на дію згинального моменту становив 71,2 мм, що на 21,2% менше розрахункового 90,3 мм. Максимальна ширина розкриття тріщин при перевірці на дію згинального моменту і контрольному навантаженні була 0,05 мм, що в 3 рази менше максимально допустимої ширини розкриття 0,15 мм.

Прогини балки, зафіксовані прогиноміром Аістова і методом ЦКЗ, відрізняються між собою на 3..12%, що свідчить про можливість використання методу ЦКЗ для дослідження залізобетонних конструкцій.

**В четвертому розділі** з метою розробки рекомендацій з проектування монолітних попередньо напружених залізобетонних прогонових будов (ПНЗПБ) мостів були виконані дослідження відповідної конструкції прогонової будови – естакади з натягом арматури на бетон (рис. 7), що знаходиться вздовж вулиці Набережно-Хрещатицька в м. Києві. Схема естакади – балочна нерозрізна загальною довжиною 309 м. Попереднє напруження прогонової будови створене обтиском при дії 28 пучків канатної арматури. Кожен пучок складається із 19 семидротових канатів К-7 з номінальним діаметром 15,2 мм за європейським стандартом EN 10138-98. Сила натягу кожного пучка – 3520 кН (згідно проектної документації).

Програма досліджень включала науково-технічний супровід спорудження естакади, її обстеження, статичні та динамічні випробування та аналіз виникнення дефектів при спорудженні.

За участі автора роботи було розроблено технологічний регламент бетонування прогонової будови естакади і здійснювався науково-технічний супровід її будівництва. Під час обстеження конструкцій збудованого моста було виявлені дефекти елементів, що можуть знижувати довговічність споруди – в окремих місцях поздовжні та поперечні тріщини по нижній грані залізобетонних прогонових будов з шириною розкриття до 0,1-0,3 мм. Естакада була розрахована методом скінчених елементів з використанням ПК «ЛИРА САПР» на проектні навантаження А-15; НК-100 та випробувальні навантаження. Випробувальним навантаженням були п'ять автомобілів МАЗ завантажених баластом загальною вагою 1606 кН, які послідовно встановлювались в кожному прогоні. При випробуванні інтенсивність навантаження становила 61-81% по відношенню до нормативного навантаження А-15. Під час статичного випробування прогонової будови вимірювали її прогини, відносні деформації та реєстрували сигнали АЕ.

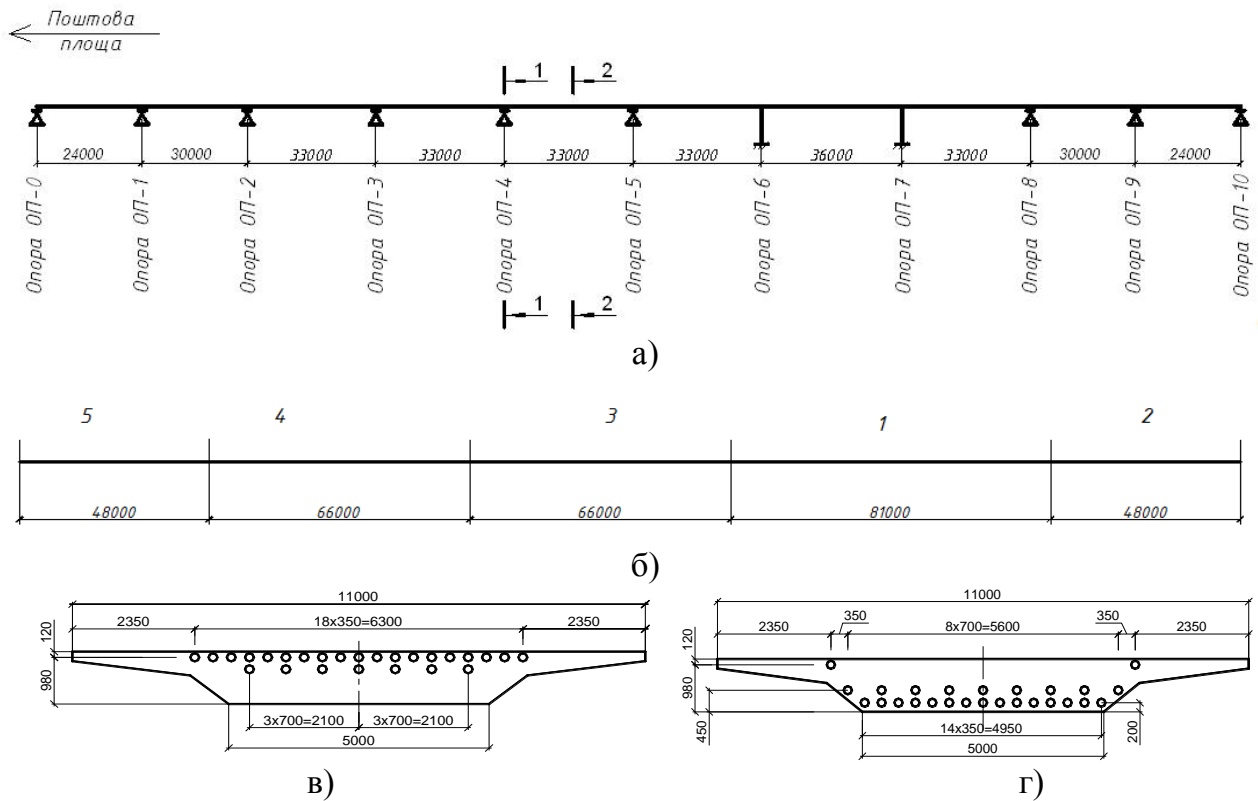


Рис. 7. Схема естакади (а); секції спорудження естакади (б), переріз 1-1 (в); переріз 2-2 (г)

Виміряні прогини значно менші значення  $1/400 l_p$ , яке допускається ДБН В. 2. 3-22 : 2009. Значення конструктивного коефіцієнта  $K$  повинно знаходитися в межах 0,7-1,0 згідно вимог СОУ 45.2-00018112-044 (табл. 6). Експериментальне значення показника роботи конструкції  $\alpha$  при випробуванні становило від 0,01 до 0,08, що свідчить про задовільну роботу прогонової будови (згідно СОУ 45.2-00018112-044  $\alpha$  не повинно перевищувати 0,15).

Таблиця 6

Конструктивні коефіцієнти визначені за загальними деформаціями (прогинами прогонової будови)

№ п/п	Схема завантаження (прогін)	Максимальний вимірний прогин, $f_e$ , мм	Теоретичне значення максимального прогину, $f_{cal}$ , мм	Конструктивний коефіцієнт, $K = f_e / f_{cal}$
1	№1 (9-10)	5,9	5,7	1.035
2	№2 (9-10)	5,0	5,0	1.000
3	№3 (8-9)	7,4	7,8	0.949
4	№4 (7-8)	8,9	8,8	1.011
5	№5 (6-7)	10,5	9,0	1.167
6	№6 (5-6)	9,4	8,7	1.080
7	№7 (4-5)	10,6	11,1	0.955
8	№8 (3-4)	10,4	11,2	0.929
9	№9 (2-3)	6,9	10,8	0.639
10	№10 (1-2)	7,8	7,9	0.987
11	№11 (0-1)	4,6	4,8	0.958

Згідно результатів динамічних випробувань максимальні значення динамічного коефіцієнту знаходяться в межах 1,188 – 1,239, вони є меншими за розрахунковий динамічний коефіцієнт 1,3 згідно вимог норм.



Оцінка небезпеки процесів, що відбуваються в структурі матеріалів естакади, здійснювали шляхом аналізу кінетики розвитку випромінювання АЕ при навантаженні прогонової будови моста трьома ступенями з використанням спільного аналізу даних, отриманих на всіх ступенях завантаження. Графік залежності прогину  $f$  від моменту  $M$  для кожного етапу завантаження показаний на рис. 8, а. Кут нахилу прямої графіку не змінюється. Це свідчить, що в прогоновій будові відсутні тріщини (перелом графіка  $f$ - $M$  свідчить про утворення тріщин). Відповідно при даних навантаженнях не були зареєстровані сигнали АЕ, які свідчать про утворення макротріщин ( $K_p < 6$ ).

Результат проведеної обробки даних АЕ показав, що при випробувальному навантаженні в прогоновій будові не виникають тріщини та існує залежність між рівнем навантаження і накопиченою енергією сигналів АЕ, що приведена на рис. 8, б. При цьому значення коефіцієнтів в апроксимуючому виразі (формули (3) і (4)) рівні:  $a = 0.03549$ ;  $b = -3.67329$ . Значення показника степені  $b < 3$ , тобто при навантаженні прогонової будови моста існуючі тріщини не мають тенденції до розвитку і не є небезпечними.

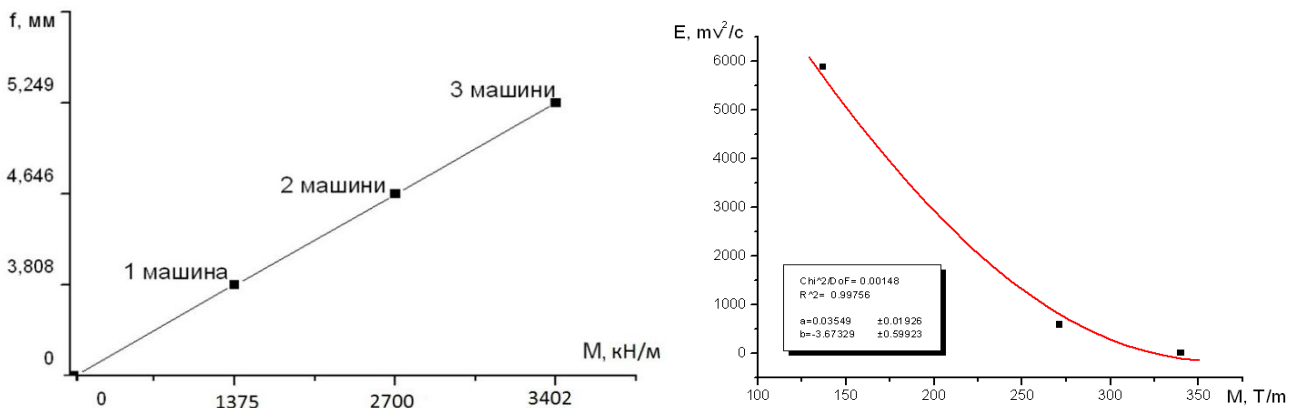


Рис. 8. Графік залежності прогину  $f$  від моменту  $M$  (а); залежність нагромадження енергії сигналів АЕ зафіксованих ПАЕ-1 від навантаження в циклі (б)

Аналіз даних, отриманих при статичних та динамічних випробуваннях естакади показав, що всі основні параметри споруди знаходяться в межах діючих норм щодо проектування мостів.

В ПК «ЛІРА САПР» була створена нелінійна просторова розрахункова схема монтажу конструкції прогонової будови, яка включала в себе поетапний монтаж секцій, почерговий монтаж арматури згідно проектних координат та її поетапний натяг (рис. 9). Згідно ДБН В.2.3 – 22:2009 при змішаному армуванні за другою групою граничних станів граничне напруження на розтяг в бетоні становить  $0,8 R_{btsr}$ , що для даних умов натягу конструкції становить 1,28 МПа. Напруження в бетоні, що виникали при натягу, не перевищували допустимих.

В ПК «MIDAS» виконаний розрахунок термонапруженого стану торцевого фрагменту масиву 5-ої секції на стику з 4-ою (рис. 10). При аналізі розрахунку виявлено, що допустимі на розтяг напруження в бетоні перевищені на 80-ту годину його тужавіння (2,12 МПа) в зонах, де при будівництві утворились тріщини. Отже, причиною утворення цих тріщин були термонапруження в масиві бетону. Тому при проектуванні монолітних залізобетонних конструкцій необхідно, крім розрахунку за граничними станами, при експлуатації та монтажі конструкції проводити розрахунок

термонапруженого стану при тужавінні бетону при спорудженні. В роботі приведені заходи для регулювання температури в масиві бетону технологічними або хімічними способами.

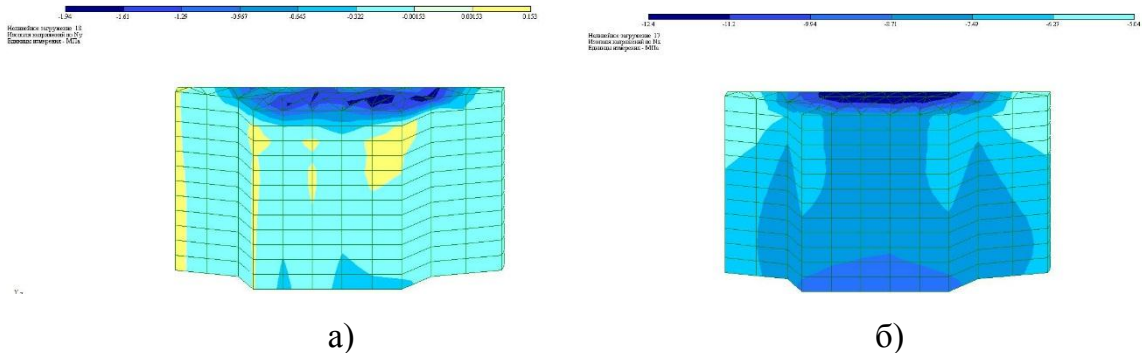


Рис. 9. Фрагмент розрахункової моделі на початку 5-ої секції бетонування з напруженнями бетону: а – по глобальній осі x (вид знизу); б – по глобальній осі y, вздовж естакади (вид знизу)

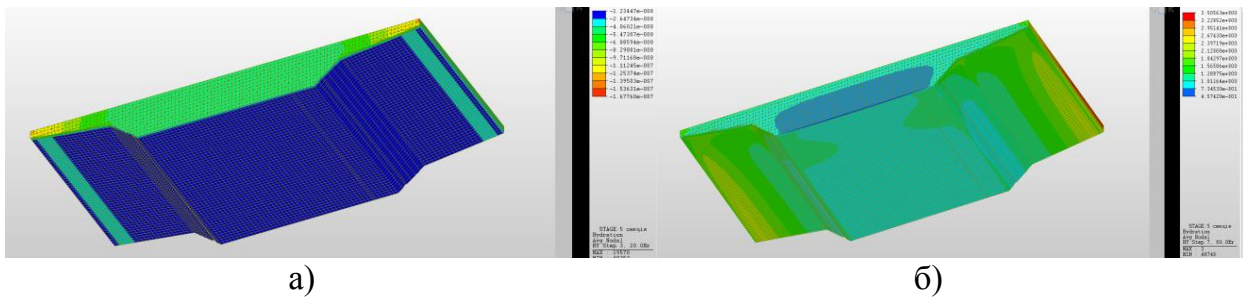


Рис. 10. Температурні напруження при наборі міцності бетону торцевої частини прогонової будови 5-ої секції на стику з 4-ою: а – 20 год, б – 80 год

Результати досліджень розділу 4 використані при розробці *Рекомендацій* із проектування монолітних залізобетонних прогонових будов мостів із напруженням на бетон (пост-напружені системи).

У **п'ятому розділі** виконано теоретичний і натурний аналіз експлуатаційного стану різних типів прогонових будов залізобетонних мостів без попереднього напруження та з попереднім напруженням арматури (табл. 7, рис. 11) за критеріями тріщиностійкості при дослідженні з використанням методу АЕ.

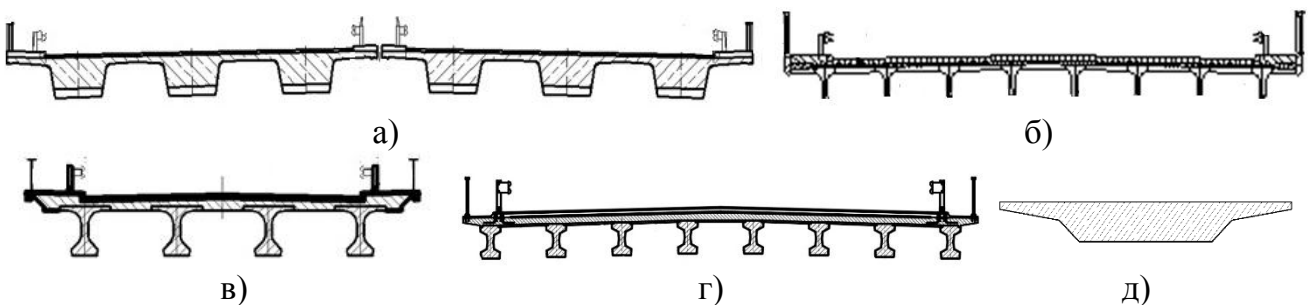


Рис. 11. Типи прогонових будов до табл. 7 : а – I тип, б – II тип, в – III тип, г – IV тип, д – V тип

Отримані згідно програми табл. 7 дані акустико-емісійних досліджень мостів були оброблені згідно методики МВВ 218-03450778-240-2004 та були визначені для кожного типу прогонової будови критеріальні оцінки  $K_p$  і коефіцієнти  $b$ , які порівнювались за критеріями тріщиностійкості за методикою АЕ : критеріальна оцінка  $K_p \geq 6$  – виникають тріщини, коефіцієнт  $b \geq 3$  в формулах (3) і (4) – дефекти

Таблиця 7

## Програма досліджень залізобетонних мостів за критеріями тріщиностійкості

N групи	Шифр мостів	Тип прогонової будови	Вид армування	K-сть, шт
I	I-1	Монолітна	Звичайна арматура	1
II	II-1, II-2, II-3	Збірно-монолітні	Звичайна арматура каркасне армування	3
III	III-1, III-2, III-3, III-4, III-5	Збірно-монолітні двотаврові балки	Попередньо напружена арматура	5
IV	IV-1	Збірно-монолітні I- подібні балки	Попередньо напружена арматура	1
V	V-1, V-2	Монолітні	Попередньо напружена арматура	2

Таблиця 8

## Результати досліджень залізобетонних мостів за критеріями тріщиностійкості

№	Тип прогонової будови	Критеріальна оцінка $K_p$	Коеф. b	Висновок щодо утворення та поширення дефектів
I-1	Монолітна прогонова будова з звичайним армуванням	6,5	5,6	Існуючі та утворені дефекти мають тенденцію до розвитку
II-1	Збірно-монолітні прогонові будови по балкам з каркасним армуванням	5,8	7,8	Дефекти є небезпечними і розвиваються
II-2		5,9	10,73	Дефекти є небезпечними і розвиваються
II-3	Прогонова будова зі збірно-монолітними балками	5,6	2,05	Відсутність тріщиноутворення
III-1	Збірно-монолітні прогонові будови з двотавровими попередньо напруженими балками	6,2	-2,7	Відсутня небезпека розвитку дефектів
III-2		4,2	-	Відсутність тріщиноутворення
III-3		6,51	1,85	Утворені дефекти не розвиваються
III-4		5,3	2,36	Відсутність тріщиноутворення
III-5		4,49	0,20	Відсутність тріщиноутворення
IV-1	Збірно-монолітна прогонова будова з і-подібними попередньо напруженими балками	3,0	0	Відсутність тріщиноутворення
V-1	Монолітні попередньо напружені прогонові будови	5,9	1,79	Відсутність тріщиноутворення
V-2		3,78	1,04	Відсутність тріщиноутворення

мають небезпечну тенденцію до розвитку. Результати досліджень систематизовані в табл. 8.

Аналіз критеріїв тріщиностійкості за методом АЕ залізобетонних прогонових будов (коефіцієнтів  $K_p$  і  $b$ ) дає наступні результати : у залізобетонних монолітних та збірно-монолітних прогонових будовах мостів із звичайним каркасним армуванням виникають дефекти типу тріщин, що мають небезпечну тенденцію до розвитку.

Збірно-монолітні та монолітні попередньо напружені прогонові будови мостів при дослідженні показали відсутність виникнення тріщин в балках і перспективи виникнення небезпечних процесів тріщиноутворення. Оскільки довговічність залізобетонних конструкцій залежить від тріщиностійкості, варто при прогнозуванні проектної довговічності конструкцій мостів враховувати не тільки тип конструкції (збірно-монолітні, монолітні), але і вид армування (звичайна чи попередньо напружена арматура).

Одним з важливих критеріїв довговічності мостів є тріщиностійкість, тому було проаналізовано тріщиноутворення в залізобетонних конструкціях прогонових будов мостів під час експлуатації на автомобільних дорогах з високою інтенсивністю руху.

Об'єктами дослідження були 37 залізобетонних мостів на автомобільній дорозі Київ-Одеса. Ці мости були розділені на 4 типи конструкцій:

- I – балочні розрізні з каркасною арматурою – 1 шт.;
- II – рамно-балочні без попереднього напруження – 5 шт.;
- III – балочні розрізні попередньо напружені – 29 шт.;
- IV – рамно-балочні з попереднім напруженням – 2шт.

Програма досліджень включала обстеження цих мостів на момент здачі після будівництва в експлуатацію, випробування по одному мосту кожного типу з використанням методу акустичної емісії. Моніторинг технічного стану мостів включав повторне обстеження цих мостів через 5 років експлуатації.

На момент першого обстеження в прогонових будовах мостів усіх типів не було виявлено силових тріщин. При статичних випробуваннях дослідних мостів всіх чотирьох типів при рівні завантаження 60-80% від розрахункового не було виявлено силових тріщин. Мости досліджувались також методом АЕ згідно методики, описаної вище.

Як показали випробування дослідних об'єктів з використанням методу АЕ, коефіцієнт  $b$  для мостів з прогоновими будовами без попереднього напруження типу I і II був  $b = 5,6$  і  $b = 10,73$ , більшим 3 ( $b > 3$ ), що свідчило про те, що в цих конструкціях будуть виникати тріщини, які мають тенденцію до небезпечного розвитку. Для мостів з попереднім напруженням прогонових будов типу III і IV максимальний показник степені був  $b = 0,2$  і  $b = 1,04$ , меншим 3 ( $b < 3$ ), що свідчило про те, що в них не виникають дефекти із небезпечними тенденціями розвитку.

Як показали обстеження 37 мостів через 5 років, у всіх прогонових будовах без попереднього напруження мостів I і II типів виникли силові тріщини з шириною розкриття до 0,2-0,3 мм. У всіх прогонових будовах мостів з попереднім напруженням III і IV типів силові тріщини були відсутні.

Враховуючи, що силові тріщини в залізобетонних балкових конструкціях при циклічних навантаженнях мають тенденцію до збільшення ширини розкриття, що підтверджено дослідженнями автора, на автомобільних дорогах I-х категорій з

високою інтенсивністю руху (більше 10 000 авт/добу) рекомендується за критеріями тріщиностійкості і довговічності влаштовувати тільки ПНЗПБ і не використовувати залізобетонні прогонові будови із звичайним армуванням.

Розглянуто два варіанти влаштування прогонових будов на конкретному об'єкті: I – з балками без попереднього напруження; II – з попередньо напруженими балками. Показано, що при врахуванні затрат на будівництво і ремонт прогонових будов при використанні попередньо напружених балок досягається економія 338,9 тис. грн.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Основні наукові і практичні результати проведених досліджень полягають у наступному:

1. Встановлено, що при дослідженні залізобетонних попередньо напружених балок, армованих канатною арматурою європейського типу, на дію малоциклових навантажень високого рівня їх несна здатність зменшувалась до 5%.

2. Запропоновано при визначенні ширини розкриття тріщин в попередньо напружених балках враховувати дію малоциклових навантажень високого рівня введенням коефіцієнта  $\psi_{cyc}^{crc}$ , який при повторних навантаженнях рівня  $0,6 R_{cr}$  приймається  $\psi_{cyc}^{crc} = 1,41$ ; при рівні навантажень  $0,75 R_{cr}$  –  $\psi_{cyc}^{crc} = 1,59$ .

3. Запропоновано при визначенні прогинів попередньо напружених балок враховувати дію малоциклових навантажень високого рівня введенням коефіцієнта  $\psi_{cyc}^f$ , який при повторних навантаженнях рівня  $0,6 R_{cr}$  приймається  $\psi_{cyc}^f = 1,12$ ; при рівні навантажень  $0,75 R_{cr}$  –  $\psi_{cyc}^f = 1,67$ .

4. Встановлено випробуваннями на дію багатоциклових навантажень попередньо напружених балок, армованих канатами К-7 європейського типу, що їх розрахунок на витривалість можна виконувати за формулами ДБН В.2.3-14:2006 (3.72-3.75).

5. Отримано експериментальні і теоретичні дані про вплив термонапруженого стану на тріщиностійкість попередньо напружених прогонових будов при їх спорудженні. Розроблено рекомендації з визначення термонапружень та заходів щодо регулювання температури в масиві бетону технологічними або хімічними способами.

6. Експериментально встановлено, що метод цифрової кореляції зображень дає можливість фіксувати напружено-деформований стан попередньо напружених елементів. Дані про тріщиностійкість, відносні деформації і прогини, отримані методом ЦКЗ, корелюються з результатами, отриманими механічними приладами, тензометричним методом і методом АЕ.

7. Встановлено дослідженнями тріщиностійкості залізобетонних прогонових будов методом акустичної емісії, що в збірно-монолітних і в монолітних прогонових будовах із звичайним армуванням виникають тріщини, які мають тенденцію до небезпечного розвитку, а в прогонових будовах із попередньо напруженою арматурою небезпечні процеси тріщиноутворення відсутні. Тому проектний строк служби залізобетонних прогонових будов варто визначати не тільки за типом конструкції (збірно-монолітні, монолітні), а і за видом армування, яке суттєво впливає на довговічність конструкцій.

Економічно обгрунтовано, що використання конструкцій збірно-монолітних прогонових будов з попередньо напруженою арматурою раціональніше в порівнянні

зі звичайним армуванням. При розгляді варіантів прогонових будов мостів необхідно враховувати, що експлуатаційні витрати на прогонові будови мостів без попереднього напруження будуть вищі, ніж у попередньо напружених прогонових будовах.

8. За результатами досліджень рекомендується на автомобільних дорогах з високою інтенсивністю руху – більше 10 000 авт/добу (I-х категорій) будувати мости із попередньо напруженими прогоновими будовами і не влаштовувати залізобетонні прогонові будови із звичайним армуванням.

В результаті виконання дисертаційної роботи розроблено Рекомендації із проектування монолітних залізобетонних попередньо напружених прогонових будов мостів із напруженням на бетон (пост-напружені системи).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

### Публікації у фахових виданнях

1. Дослідження тріщиностійкості монолітної попередньо напруженої естакади методом акустичної емісії / Коваль П. М., Сташук П. М., Ковальчик Я. І. // Дороги і мости : зб. наук. пр. – К., 2010. – № 12. – С. 56-62.

2. Робота залізобетонного монолітного попередньо напруженого нерозрізного моста під навантаженням / Коваль П. М., Сташук П. М., Ковальчик Я. І. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2011. – № 22. – С. 658-665.

3. Дослідження монолітної попередньо напруженої залізобетонної автодорожньої естакади / Коваль П. М., Фаль А.Є., Сташук П. М., Ковальчик Я. І. // Автошляховик України. – К., 2011. – № 4 (222). – С. 39-44. *Видання входить до наукометричних баз даних систем реферування.*

4. Дослідження напружено-деформативного стану залізобетонних попередньо напружених балок методом цифрової кореляції зображень / П. М. Коваль, Я. Л. Іваницький, Ю. В. Мольков, Я. І. Ковальчик // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – Дніпропетровськ, 2012. – № 3. – С. 75–79.

5. Ковальчик Я. І. Перспективи використання методу цифрової кореляції зображень для дослідження будівельних конструкцій / Я. І. Ковальчик // Зб. наук. пр. ПолтНТУ. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава, 2012. – № 5 (35). – С. 92–100.

6. Напружено-деформований стан збірних попередньо напружених балок серії «МЗБК-160» / Коваль П.М., Сташук П.М., Стоянович С.В., Ковальчик Я.І., Бугера А.Р. // Автошляховик України. – К., 2013. – № 5 (222). – С. 38-44. *Видання входить до наукометричних баз даних систем реферування.*

7. Збірні залізобетонні попередньо напружені балки для автодорожніх мостів / П. М. Коваль, І. П. Бабяк, Я. І. Ковальчик, М. Б. Горба // Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – Львів, 2013. – № 755. – С. 184-188. *Видання входить до наукометричних баз даних систем реферування.*

8. Дослідження напружено-деформованого стану бетонних зразків методом цифрової кореляції зображень / Коваль П. М., Іваницький Я. Л., Ковальчик Я. І., Мольков Ю. В. // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К., 2013 – № 89. – С. 185-192.

9. Коваль П. М. Критерії акустичної емісії при оцінці тріщиностійкості залізобетонних попередньо напружених балок при малоциклових навантаженнях / П.М. Коваль, П.М. Сташук, Я.І. Ковальчик // *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій* : зб. наук. пр. / НАН України, ФМІ ім. Г. В. Карпенка. – Львів, 2014. – Вип. 10. – С. 449-460.

10. Дослідження тріщиностійкості попередньо напружених залізобетонних балок при дії малоциклових навантажень / П. М. Коваль, Я. І. Ковальчик // *Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей* : наук. нотатки. – Луцьк, 2014. – № 45. – С. 282-287. *Видання входить до наукометричних баз даних систем реферування.*

11. Аналіз термонапруженого стану монолітної попередньо напруженої естакади / Ковальчик Я. І., Сташук П. М., Фаль А. Є., Бабяк І. П. // *Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва.* – Львів, 2015. *Видання входить до наукометричних баз даних систем реферування.*

#### **Публікації у закордонних виданнях**

12. Испытание монолитного предварительно напряженного железобетонного моста / П. Н. Коваль, П. М. Сташук, Я. И. Ковальчик // *Современные тенденции и направления строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог и искусственных сооружений.* – Минск, 2012. – С. 100–107.

13. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных предварительно напряженных балок при малоциклических нагрузках методами цифровой корреляции изображений и акустической эмиссии / П. Коваль, Я. Ковальчик, Ю. Мольков, О. Гримак // *Сборник статей 16-й конференции молодых ученых «Наука-будущее Литвы».* – Вильнюс, 2013. – № 16. – С. 188–193.

14. Kovalchuk Y. I. Analysis of the thermo-stressed state of reinforce-concrete monolithic bridge span / Kovalchuk Y. I., Bugera A. R. // *Proceedings of the 17th conference for junior researchers «Science – future of Lithuania».* – Vilnius, 2014. - № 17. – P. 49-54.

#### **Інші публікації**

15. Випробування бетонних кубів та призм з тепловізійним спостереженням зразків та реєстрацією сигналів акустичної емісії при руйнуванні / Коваль П., Солодкий С., Прохоренко С., Ковальчик Я. // *Вимірювальна техніка та метрологія.* – Львів, 2013. – № 74. – С. 40-44.

16. Ковальчик Я. І. Проблема термонапруженого стану в масивах бетону монолітних прогонових будовах мостів / Ковальчик Я. І., Левківська Л. В. // *Українська академія мистецтв. Дослідницькі та науково-методичні праці.* – К., 2014. – Вип. 23. – С. 151-157.

#### **АНОТАЦІЯ**

**Ковальчик Я.І. Міцність, тріщиностійкість та деформативність попередньо напружених балкових залізобетонних прогонових будов мостів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний авіаційний університет, Київ, 2015.

Досліджено міцність, тріщиностійкість, деформативність та витривалість залізобетонних попередньо напружених балок із канатною арматурою європейського типу при дії одноразових, малоциклових та багатоциклових навантажень.

Виконано статичні та динамічні випробування монолітної попередньо напруженої прогонової будови естакади та отримано дані про вплив термонапруженого стану при влаштуванні таких прогонових будов мостів на їх тріщиностійкість.

Розроблено рекомендації щодо використання на автомобільних дорогах з високою інтенсивністю руху ефективних залізобетонних прогонових будов з попереднім напруженням за критерієм тріщиностійкості з використанням методу акустичної емісії та рекомендації із проектування монолітних залізобетонних попередньо напружених прогонових будов мостів із напруженням на бетон.

**Ключові слова:** залізобетонні прогонові будови мостів, попередньо напружена залізобетонна балка, автодорожні мости, циклічні навантаження, акустична емісія.

## АННОТАЦИЯ

**Ковальчик Я.И. Прочность, трещиностойкость и деформативность предварительно напряженных балочных железобетонных пролетных строений мостов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – Национальный авиационный университет, Киев, 2015.

Исследована прочность, трещиностойкость, деформативность и выносливость железобетонных предварительно напряженных балок при воздействии одноразовых, малоцикловых и многоцикловых нагрузок.

Выполнено статические и динамические испытания монолитной предварительно напряженной пролетного строения эстакады и получены данные о влиянии термонапряженного состояния при устройстве таких пролетных строений мостов на их трещиностойкость.

Разработаны рекомендации по использованию на автомобильных дорогах с высокой интенсивностью движения эффективных железобетонных пролетных строений с предварительным напряжением по критерию трещиностойкости с использованием метода акустической эмиссии и рекомендации по проектированию монолитных железобетонных предварительно напряженных пролетных строений мостов с напряжением на бетон.

**Ключевые слова:** железобетонные пролетные строения, предварительно напряженная железобетонная балка, автодорожные мосты, циклические нагрузки, акустическая эмиссия.



**ABSTRACT****Kovalchyk Y.I. Strength, fracture toughness and deformation of prestressed concrete beam bridges spans. – Manuscript.**

The dissertation for obtaining the degree of candidate of technical science, speciality 05.23.01 – Building constructions, buildings and structures. – National Aviation University, Kyiv, 2015.

The strength, crack resistance, deformation of prestressed concrete beams with reinforcement of the European rope type by the action of single, low-cycle and cycle loads have been researched. The full scale prestressed bridge beams on carrying capacity in bending moment and transverse force were tested.

The possibility of using the method of digital image correlation analysis of the stress-strain state of reinforced concrete structures has been established.

Researched work on endurance of prestressed reinforced concrete beams laboratory samples has been prestressed by rope reinforcement of European type.

The data about the reducing of prestressed beams strength due to the impact of high level low-cycle loads were received.

The construction support, review, static and dynamic tests and theoretical analysis of a continuous pre-stressed monolithic span overpass at different stages of work were completed. Acoustic emission data were got. The data on the impact thermostressed state that depends of hydration reaction in the concrete array during constructing bridges spans on their crack resistance.

The recommendations for using effective concrete spans the previous stress on roads with high traffic according crack resistance criteria for using acoustic emission method.

The economic feasibility of using prefabricated monolithic spans of prestressed beams on roads with high intensity compared with prefabricated monolithic spans of beams with ordinary reinforcement was shown. It recommends during constructing concrete spans transport constructions and road's traffic categories with more than 10,000 cars/day to use only pre-stressed structures.

The recommendations for designing monolithic prestressed concrete bridges with spans stressed on concrete (post-tension systems) were developed.

**Keywords:** reinforced concrete bridge span structure, prestressed concrete beams, highway bridges, cyclic loading, acoustic emission.