

**УДК 691.328.43+624.042.8**

**Гамеляк І.П., д-р техн. наук, Коваль Т.І.**

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИПРОБУВАНЬ НА ВТОМУ  
БЕТОНИХ ПЕРЕРІЗІВ ЕЛЕМЕНТІВ АРМОВАНИХ НЕМЕТАЛЕВОЮ  
КОМПОЗИТНОЮ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЮ АРМАТУРОЮ**

**Анотація.** В статті наведено один із альтернативних способів армування бетонних конструкцій автомобільних мостів неметалевою композитною базальтопластиковою арматурою для уникнення процесів корозії та запропоновано спосіб дослідження таких конструкцій на витривалість.

Об'єкт дослідження - розробка та удосконалення методики випробувань базальтобетонних зразків на витривалість в лабораторних умовах.

Мета дослідження - спираючись на попередні дослідження витривалості різних матеріалів, визначити методику випробування базальтобетонних зразків.

Методи дослідження: - аналітичні.

Проблема корозійної стійкості мостових споруд існує від самого народження ідеї залізобетонних мостів. Застосування неметалевої композитної базальтопластикової арматури, завдяки її фізико-механічним якостям, може стати вирішенням цієї проблеми. Але на сьогоднішній день в Україні немає нормативних документів, які би могли дозволити використовувати неметалеву базальтопластикову арматуру у мостобудівництві з огляду на малодосліджену роботу таких споруд при дії багаторазово повторюваного циклічного навантаження, тобто конструкцій, які потребують розрахунку за першою групою граничних станів на витривалість. Отже, з метою розширення сфери застосування неметалевої базальтопластикової арматури і вирішенню питання корозійної вразливості мостів, проводиться масштабне дослідження роботи базальтобетонних конструкцій на дію багаторазово повторюваного навантаження і в рамках даної статті описується методика проведення таких експериментів та результати по випробуваному за розробленою методикою першому зразку.

Результати статті будуть використані для подальших досліджень роботи базальтобетонних споруд на витривалість.

Прогнозні припущення щодо об'єкту дослідження – удосконалення методики випробувань базальтобетонних зразків на витривалість дозволить підібрати оптимальний набір параметрів, що будуть описувати зміну напружено-деформаційного стану таких конструкцій в процесі експлуатації.

**Ключові слова:** базальтобетон, довговічність, методика випробувань, надійність, неметалева композитна базальтопластиковая арматура.

**УДК 691.328.43+624.042.8**

**Гамеляк И.П., д-р техн. наук, Коваль Т.И.**

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ БЕТОННЫХ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ, АРМИРОВАННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОМПОЗИТНОЙ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЮ АРМАТУРОЙ**

**Аннотация.** В статье приведен один из альтернативных способов армирования бетонных конструкций автомобильных мостов неметаллической композитной базальтопластиковой арматурой во избежания коррозионных процессов и предложено способ исследования таких конструкций на выносливость.

Объект исследования – разработка и усовершенствование методики испытаний базальтобетонных образцов на выносливость в лабораторных условиях.

Цель работы – опираясь на предыдущие исследования выносливости разных материалов, определить методику испытаний базальтобетонных образцов.

Методы исследования – аналитические.

Проблема коррозионной стойкости мостовых сооружений существует с самого рождения идеи железобетонных мостов. Применение неметаллической композитной базальтопластиковой арматуры, благодаря ее физико-механическим качествам, может стать решением этой проблемы. Но на сегодняшний день в Украине нет нормативных документов, которые бы могли позволить использовать неметаллическую базальтопластиковую арматуру в мостостроении учитывая малоисследованную работу таких сооружений при действии многократно повторяющейся циклической нагрузки, то есть конструкций, требующих расчета по первой группе предельных состояний на

выносливость. Поэтому, с целью расширения сферы применения неметаллической базальтопластиковой арматуры и решению вопроса коррозионной уязвимости мостов, проводится масштабное исследование работы базальтобетонных конструкций на действие многократно повторяющейся нагрузки и в рамках данной статьи описывается методика проведения таких экспериментов, а также результаты по испытанном по разработанной методике первом образце.

Результаты статьи будут использованы для дальнейших исследований работы базальтобетонных сооружений на выносливость.

Прогнозы относительно объекта исследования - совершенствование методики испытаний базальтобетонных образцов на выносливость позволит подобрать оптимальный набор параметров, которые будут описывать изменение напряженно-деформационного состояния таких конструкций в процессе эксплуатации.

**Ключевые слова:** базальтобетон, долговечность, методика испытаний, надежность, неметаллическая композитная базальтопластиковая арматура.

**UDC 691.328.43+624.042.8**

**Gameliak I.P., Dr. Tech. Sci., Koval T.I.**

### **IMPROVEMENT OF METHODS FOR FATIGUE OF THE CONCRETE ELEMENT SECTIONS, REINFORCED NON-METALLIC COMPOSITE BASALT REBAR**

**Abstract.** One of alternative ways of concrete bridges elements reinforced by basalt fiber reinforced polymer composites (BFRP) armature is shown in this article. This reinforcement could be using for corrosion processes avoidancing in bridges. Also article proposes the method of laboratory fatigue research of such elements samples.

The object of study – Developing and improving of fatigue researching of concrete samples with BFRP in laboratory conditions method.

Purpose – based on previous studies of endurance different materials, to determine the method of concrete sample with BFRP testing.

Research methods – analytical.

The problem of corrosion resistance bridges exist from birth the idea of reinforced concrete bridges. The use of BFRP, due to its physical and mechanical qualities, may be the solution to this problem. But today in Ukraine there are no regulations that would allow using BFRP in building of bridges because of unexplored structures in the repetitive action of cyclic loading, that means that structures with require payment for the first group of limiting states of endurance. So, in order to expand the scope of BRFP reinforcement corrosion and the issue of vulnerability of bridges, carried out large-scale study of the effect concrete elements with BFRP designs repetitive stress and this article describes the technique of these experiments and the results on the subject developed technique for the first sample.

The results of the article will be used for further research work щтскуеуеу facilities with BFRP endurance.

Projected assumptions about the object of study - improving testing methods concrete samples with BFRP endurance will choose the best set of parameters describing the change of the stress-strain state of structures in service.

**Keywords:** basalt fiber reinforced polymer composites (bfrp) armature, concrete with bfrp, fatigue, calculating method, durability.

### **Постановка проблеми**

Відомо, що однією з головних проблем у сфері мостобудівництва є корозія металевих елементів споруди [1, 2, 3]. Корозія сталевих конструкцій транспортних споруд може зменшити термін служби із проектних 100 до фактичних 25 років. Навіть у залізобетонних конструкціях, де арматура захищена бетоном, при впливі ряду негативних факторів, виникає корозія, що зменшує несну здатність елементів споруд. У практиці влаштування залізобетонних конструкцій існує ряд методів для запобігання цьому руйнівному процесу: збільшення товщини захисного шару, обробка арматури полімерними апретуючими складами, армування нижньої зони стрічками, заміна металевої арматури на неметалеву тощо [1]. Останній спосіб є одним з найбільш ефективних.

### **Аналіз новітніх досліджень**

Неметалева композитна арматура – це композитний матеріал, який поставляється у вигляді стрижня періодичного профілю, може мати різну площу поперечного перерізу і виготовляється шляхом спіральної обмотки

стрижня джгутом із вдавлюванням його у тіло стрижня або без вдавлювання джгута. Цей виріб для армування бетону є альтернативою металу і має таку властивість, як діелектричність, що дозволяє використовувати таку арматуру при спорудженні будівель спеціального призначення, а також шляхопроводів через залізницю. Доцільним застосуванням такої арматури може бути у конструкціях, які зазнають впливу агресивного середовища. Типовим прикладом такої конструкції є плита проїзної частини мосту.

Перша державна програма по дослідженню і застосуванню композитної арматури "Застосування технології композитних матеріалів у проектуванні і будівництві мостів" була прийнята Міністерством транспорту США у 1983 році. В рамках цієї програми розроблялись проекти по використанню композитної арматури для реконструкції існуючих мостових конструкцій і зведенню нових [4].

На сьогоднішній день в Україні досить добре досліджено характер спільної роботи бетону та неметалевої композитної базальтопластикової арматури [5 - 8] і діють нормативні документи, які регламентують сферу застосування неметалевої арматури [9, 10]. Однак, нормативний документ [9] не дозволяє використовувати базальтопластикову арматуру в конструкціях, що розраховуються на витривалість та зазнають впливу багаторазово повторюваного змінного навантаження. Тому необхідне проведення комплексних досліджень роботи бетонних конструкцій, армованих стрижнями базальтопластикової арматури на дію динамічного навантаження. Такі випробування характеризуються значними трудозатратами, є матеріалоємними та потребують багато часу. Для раціональних витрат ресурсів необхідний теоретичний опис процесу та розроблення відповідної методики випробувань.

#### **Постановка мети і задач досліджень**

Мета дослідження роботи бетонних балкових елементів, армованих неметалевою композитною базальтопластиковою арматурою, полягає у вивченні процесу втоми (витривалості) та розроблення методики випробувань при заданому напружено-деформованому стані конструкцій у разі впливу на них багаторазово повторюваного навантаження для розширення сфери застосування базальтопластикової арматури у мостобудівництві. Виходячи з цієї мети передбачаються наступні задачі:

1. Спираючись на математичну модель, яка встановлює закони зміни втомної міцності неметалевої арматури [11] розробити теоретичну модель втоми згинаних елементів при заданому напружено-деформованому стані базальтобетонних зразків при дії на них багаторазово повторюваного навантаження.

2. Спроекувати склад мостового цементобетону та виготовити армовані базальтопластиковою арматурою зразки для лабораторних досліджень.

3. Виконати експериментальні дослідження на декількох рівнях навантаження.

4. Провести аналіз отриманих даних та удосконалити методику модельних випробувань на втому.

### **Прилади і матеріали**

Для досліджень в лабораторії підбрано склад мостового бетону класу міцності не менше В 35.

Осадка конусу суміші склала 4 см згідно із дотриманням необхідної методики оцінки, що означає, що бетонна суміш була малорухомою. Як відомо, такий показник рухливості бетонної суміші підходить для монолітних конструкцій, бетонування стін, неармованих, або малоармованих конструкцій.

Були проведені експериментальні дослідження отриманого бетону згідно із діючим нормативним документом [12], в результаті яких встановлено, що призма міцність бетону зразків складає 52,8 МПа. відповідно до діючих мостових норм [13], а саме п. 3.25 та 3.26, встановлення параметру розрахункового опору при дії на них повторних навантажень бетону на стиск відбувається із врахуванням коефіцієнтів умов роботи, наведених у формулі (1):

$$R_{bf} = 0,6 \cdot \beta_b \cdot \varepsilon_b \cdot R_b, \quad (1)$$

де:  $\beta_b = 1,21$  - коефіцієнт, що враховує збільшення міцності бетону в часі;

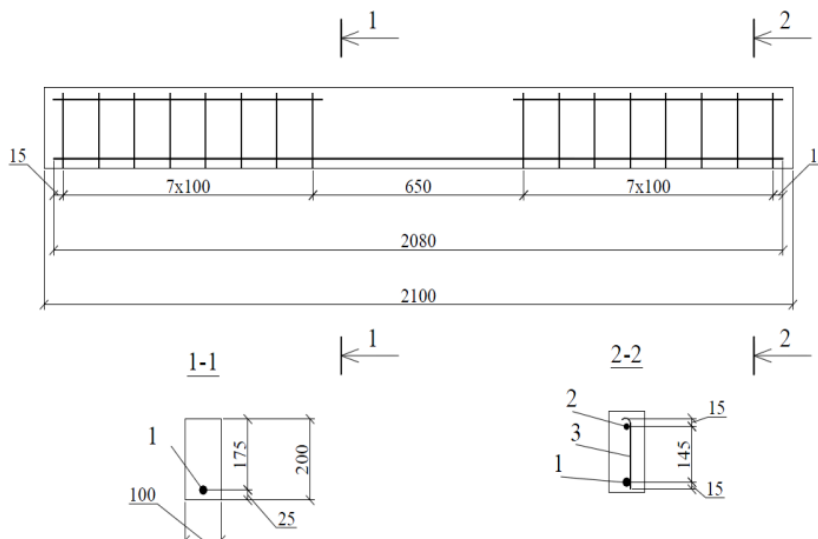
$\varepsilon_b = 1,10$  - коефіцієнт, який залежить від асиметрії циклу повторюваних напружень, який прийнято як 0,33.

Отже, розрахунковий опір бетону дослідних зразків становитиме:

$$R_{bf} = 0,6 \cdot 1,21 \cdot 1,10 \cdot 52,8 = 42,17 \text{ МПа}. \quad (2)$$

Оскільки мета дослідження передбачає отримання експериментальних даних по характеру тріщиноутворення, то проект зразків передбачав конструкції із вираженою "зоною чистого згину". Тому вони були виконані у вигляді бетонних балок із геометричними розмірами 100x200x2100 мм із одним

стрижнем робочої базальтопластикової арматури по всій довжині зразка, об'єднаним із двома металевими стрижнями довжиною 700 мм за допомогою металевих хомутів (рис. 1).



**Рисунок 1** – Конструкція залізобетонної балки: 1 – стрижень базальтопластикової арматури; 2 - 2Ø6 Вр-I; 3 - 16Ø6 Вр-I

Загалом передбачено 10 зразків бетонних балок (кожна балка має шифр серії «Б») із різними діаметрами робочої арматури: Ø4; 6; 8; 10; 12 мм. Отже, програма експериментальних дослідів включає в себе випробування 5-ти серій зразків, які класифіковані за площею армування.

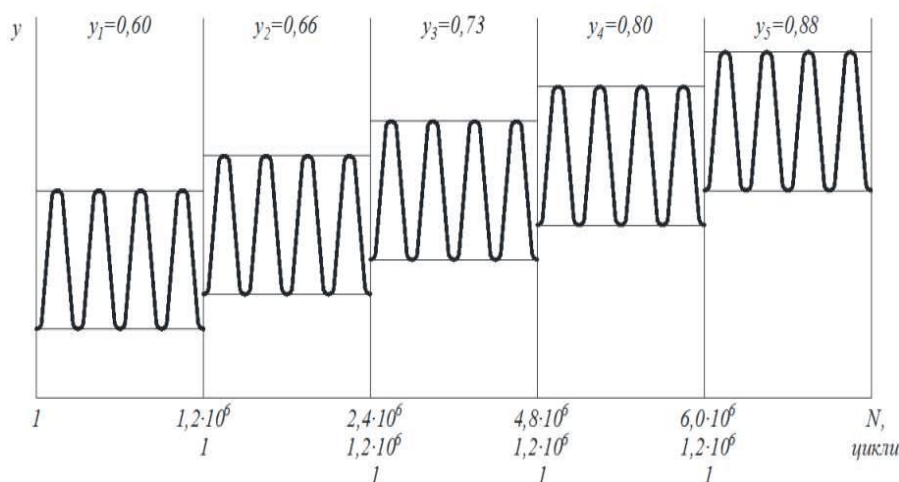
Серія Б призначена для вивчення роботи базальтобетонних згинаних елементів з різною площею армування та різним очікуваним типом руйнування при дії багаторазово повторюваного навантаження стаціонарних та нестаціонарних режимів (сталі показники характеристики циклу навантаження та різні рівні навантаження). Серія включає 5 пар балок-близнюків з однаковими діаметрами стрижнів арматури. Серія поділена на 2 групи балок, які відрізняються умовами циклічного навантаження. Випробування зразку 1-ї групи І Б-1, починають в режимі з рівнем максимального навантаження циклу  $\gamma_I=0,6$ . Зразок, що витримав 1,2 млн. циклів цього режиму, випробовують при вищому рівні навантаження. У випадку руйнування зразка серії І Б-1 при певному рівні  $\gamma_i$ , його зразок-близнюк починають випробовувати одразу при цьому ж, останньому, рівні навантаження. Слід врахувати, що при гарантованому проходженні зразка з меншим відсотком армування певного етапу, зразки із більшим відсотком армування слід завантажувати одразу при

вищих рівнях. (рис. 2). Схожа методика була використана у роботі [14] і показала, що при обмеженій кількості зразків та ресурсів можна отримати повну картину витривалості балкових елементів.

На даному етапі така кількість циклів, відмінна від класичної у 2 млн. циклів, зумовлена роботою стрижнів базальтопластикової арматури на багатоциклічні навантаження, а саме із наявністю двох умовних режимів роботи, що може бути пов'язано із особливістю сумісної роботи полімерного в'язучого та базальтового волокна в неметалевій композитній базальтопластиковій арматурі [11].

Коефіцієнт асиметрії циклу навантаження прийнятий однаковий для кожної групи  $\rho_m=0,33$ .

Кожні пройдені 100000 циклів, динамічний режим призупиняється і проводиться контроль відносних деформацій, прогинів та тріщиноутворення зразка при навантаженні балки в статичному режимі в 4 кроки: при відсутньому навантаженні, із навантаженням, що відповідає нижньому рівню навантаженню циклу, із навантаженням, яке відповідає верхньому рівню навантаженню циклу та при нульовому навантаженні. По закінченню цієї процедури починається наступний етап динамічного впливу на зразок.



**Рисунок 2** – Схема зміни циклічного навантаження для зразків при нестационарних режимах багаторазового повторюваного навантаження

Враховуючи обмежену кількість зразків дуже важливою є розробка теоретичної бази досліджень.

Теоретичні дослідження (аналітичне обґрунтування методики)

При наявності однакових зразків, один з яких піддається дії повторних навантажень, що викликають в кожному циклі напруження з амплітудою  $\sigma_I$  (чи



відносну деформацію  $\varepsilon_I$ ), а другий  $\sigma_{II}$  (чи  $\varepsilon_{II}$ ), то відповідні числа середніх кількостей прикладань повторних навантажень, який матеріал здатний витримати до руйнування, пов'язані степеневою залежністю [11, 15].

$$\frac{N_I}{N_{II}} = \left( \frac{\sigma_{II}}{\sigma_I} \right)^{a_\sigma}, \quad \frac{N_I}{N_{II}} = \left( \frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon_I} \right)^{a_s}, \quad (3)$$

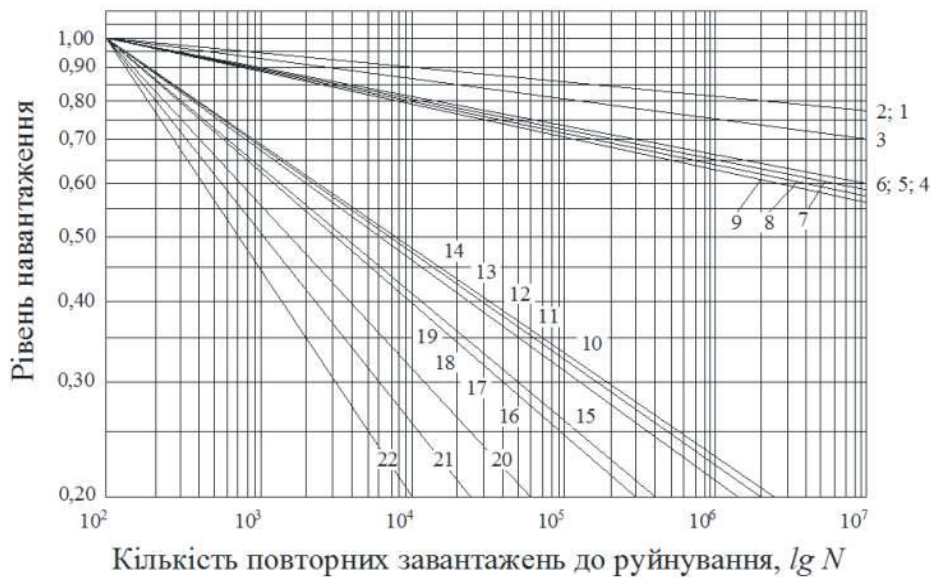
де  $a_\sigma$ ,  $a_s$  - постійні (при чому  $a_\sigma > a_s$ ), що залежить від виду та властивостей в'язучої речовини і практично не залежать від виду напружено-деформованого стану матеріалів (згин, стиск, розтяг).

Постійні  $a_\sigma$ ,  $a_s$  геометрично виражають нахил прямої втоми в логарифмічних координатах (рис. 3) та мають такі характерні значення: для холодних бітумомінеральних сумішей 2...3; асфальтобетонів на бітумах середньої в'язкості - 3,5...5; гарячих асфальтобетонів на в'язких бітумах - 5,0...6,2; ґрунтів, укріплених цементом (вапном) – 12...16; для цементобетону – 16...37 [15].

Узагальнені в роботі проф. Б.С. Радовського [15] дані різних авторів [16 - 19] по випробуванню матеріалів на втому при згині зразків, їх стиску, згині на пружній основі, розтягу, розтягу і стиску при постійній амплітуді напруження або відносній деформації з різною тривалістю навантаження та періодами відпочинку зведені на рис. 3 Обробка даних полягала в тому, що результати випробувань перераховані для координат, при яких по осі ординат відкладено рівень навантаження - логарифм відношення  $\sigma/\sigma_{100}$  або  $\varepsilon/\varepsilon_{100}$ , де  $\sigma_{100}$ ,  $\varepsilon_{100}$  - амплітудні значення напружень та деформацій, при яких зразки витримують в середньому 100 прикладань короткочасного навантаження. По осі абсцис, прийнято відкладений логарифм кількості  $N$  повторних навантажень до руйнування зразка.

Цементобетон за даними 1, 2 - Мурдок, Хільсдорф, 3 - І. М. Грушко, 4 - А. Н. Зацепін, 5 - О. Я. Берг, Т. С. Каранфілов; цементогрунт: 6 - Л. А. Марков, Бофінгер, 8 - Г. В. Малеванський, Б. С. Радовський; вапногрунт: 7 - Альберг, Мак Вінн, 9 - Свансон, Томпсон; асфальтобетон: 10-14 - Бейкер і Пазанян, Т. Н. Калашнікова, А. В. Руденський, А. О. Салль, Пелл, 15 - Еверс, 16 - І. М. Щербаков, Б. С. Радовський, 17-19 - Кучера, Лукас, Тейлор; 20 - Пелл, 21 - І. В. Корольов, Г. Р. Фоменко, Ніжбоер; дьогтебетон: 22 - Тейлор, Пелл, Б. С. Радовський, І. М. Щербаков. На жаль, на сьогоднішній день подібні дані по

залізобетону авторам невідомі, а випробування на втому бетонних перерізів армованих базальтопластиковою арматурою до даного часу не виконувалися.



**Рисунок 3** – Дані про опір дорожньо-будівельних матеріалів руйнуванню від втоми, де рівень навантаження відповідає  $\lg \frac{\sigma}{\sigma_{100}}$ ;  $\lg \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{100}}$

Загальну втомну дію від повторних прикладань колісних навантажень різної величини вважають можливим визначати шляхом сумування за правилом Пальмгрена - Майнера. При цьому виходять з таких міркувань.

Припустимо, що при циклічних напружень з однаковими амплітудами  $\sigma_1$  руйнування виникне через  $N_1^*$  циклів. Залежність між цими величинами відома з результатів випробувань на втому. Якщо такі ж напруження прикладені протягом  $N_1$  циклів, при чому  $N_1$  менше за  $N_1^*$ , то відбудеться часткове пошкодження зразка, що характеризується числом  $d_1$ , яке називають пошкодженістю. Аналогічно при циклічних напруженнях з однаковими амплітудами  $\sigma_2$  руйнування відбудеться через  $N_2^*$  циклів, а пошкодженість в результаті дії напруження  $\sigma_2$  протягом  $N_2$  циклів, де  $N_2$  менше за  $N_2^*$ , можна охарактеризувати числом  $d_2$ .

Згідно правила лінійного сумування пошкоджень вважається, що руйнування відбудеться коли сума пошкоджень від дії напружень з різними амплітудами складе одиницю:

$$d_1 + d_2 + \dots + d_k = 1, \text{ або } d_1 + d_2 + \dots + d_k = 1. \quad (4)$$

При цьому приймають, що пошкодженість внаслідок циклічної дії деякого напруження рівна відношенню фактичного числа циклів дії до повного числа циклів, яке привело б до руйнування внаслідок цього напруження.

Правило лінійного сумування пошкоджень не враховує впливу послідовності чергування великих та малих напружень. Насправді черговість дії напружень різного значення впливає на втомну довговічність, відповідно, в різних умовах навантаження може виникнути, якщо сума пошкоджень складає від 0,6 до 1,6 замість 1,0. Однак аналіз результатів випробувань дорожньо - будівельних матеріалів та суглинистих ґрунтів земляного полотна повторними навантаженнями свідчить, що в більшості випадків руйнуванню відповідає сума пошкоджень від 0,8 до 1,3. При цьому чим рандомніше чергуються великі та малі напруження, тим ближче сума пошкоджень в момент руйнування до одиниці. Отже, правило лінійного сумування може використовуватись для прогнозування довговічності дорожніх одягів, на чому і буде побудоване теоретичне обґрунтування методики випробувань базальтобетонних конструкцій.

Припустимо, що матеріал піддається  $N_1$  проїздам коліс з навантаженням  $Q_1$ , яке приводить до виникнення в конструкції напруження  $\sigma_1$  на кожне,  $N_2$  - з навантаженням  $Q_2$  напруження  $\sigma_2$  на кожне, ...,  $N_i$  - з навантаженням  $Q_i$  ( $\sigma_i$ ) на кожне. Якби повторно діяли лише колеса з навантаженням  $Q_1$ , що приводять до виникнення напружень  $\sigma_1$ , руйнування наступило би після  $N_1^*$  проїздів; лише колеса з навантаженням  $Q_2$  відповідні напруження  $\sigma_2$  - через  $N_2^*$  проїздів і т. д. Тоді сумарну пошкодженість від  $q$  різних навантажень можна виразити у вигляді суми:

$$d_q = \sum_{i=1}^q \frac{N_i}{N_i^*}. \quad (5)$$

Замінімо дію транспортного потоку з різними навантаженнями рівноцінним йому за руйнівною дією числом проїздів  $N_p$  однакових навантажень  $Q_p$ , які приймаються за розрахункові:

$$d_q = \frac{N_p}{N_p^*}, \quad (6)$$

де  $N_p^*$  - число проїздів коліс з навантаженням  $Q_p$  до руйнування покриття.

Порівнюючи (3) і (4), отримуємо:

$$N_p = \sum_{i=1}^q \frac{N_p^*}{N_i^*} \cdot N_i^* \quad (7)$$

Відношення числа проїздів до руйнування під дією навантаження, що приймається за розрахункове, до числа проїздів до руйнування під дією довільного навантаження називають коефіцієнтом для приведення до розрахункового навантаження:

$$S_i = \frac{N_p^*}{N_i^*} \quad (8)$$

З врахуванням (6), фактичний різноманітний транспортний потік з різними колісними навантаженнями заміняють рівноцінним йому по руйнуючій дії числом прикладань розрахункових навантажень

$$N_p = \sum_{i=1}^q S_i \cdot N_i \quad (9)$$

Аналогічно коефіцієнту приведення  $S_i$  по (12), в роботі [19] введено поняття про сумарний коефіцієнт  $S_{\text{ісум}}$  для приведення автотранспортного засобу  $i$ -ої марки до розрахункового (нормативного для доріг даної категорії) навантаження на колесо:

У результаті циклічної дії навантаження в бетоні ще задовго до руйнування починають виникати мікротріщини. Вони формуються при невисоких напруженнях. В результаті циклічного деформування створюються умови для високої концентрації напружень: в мікрооб'ємах матеріалу відбувається процес накопичення непружної деформації, що обумовлено структурною та фізичною неоднорідністю бетону. Це явище можна математично виразити як:

$$S_{\text{ісум}} = \sum_{i=1}^m S_i, \quad (10)$$

де  $m$  - число осей в даного транспортного засобу, для приведення якого визначається коефіцієнт  $S_j$  сум.

При визначенні розрахункової (приведеної до нормативного навантаження) інтенсивності руху  $N_p$  використовується формула

$$P_p = f_{\text{пол}} \sum_{j=1}^k N_j \cdot S_{\text{ісум}}, \quad (11)$$

де  $N_j$  - число проїздів за добу в двох напрямках транспортних засобів  $j$ -ї марки;  $f_{\text{пол}}$  - коефіцієнт, що враховує число смуг руху та розподіл руху по них.

У роботі [17] експериментально отримано, що армування базальтовими волокнами та ґратками не змінює кута нахилу кривих втоми, тому можна прийняти, що  $b_{\text{арм}} = b = 1/0,063 = 0,157 \approx 16$ .

Графічна інтерпретація очікуваних результатів випробувань на втому при різних рівнях НДС наведена на рис. 4. Слід зауважити, що для кожної лінії тренду показник апроксимації  $R = 1$ . Дані, з яких зроблено такі попередні висновки наведені та описані нижче у роботі, а результати експериментальних випробувань наведено в табл. 1 - 4.

Якщо вважати, що  $R(N)$  – теоретичний залишковий ресурс зразка після проходження ним заданої кількості циклів, то, застосувавши формули (4) – (11), можна вивести формулу теоретичного залишкового ресурсу конструкції:

$$R(N) = R_0 \cdot \left(1 - \frac{N}{N^*}\right)^{0,063}, \quad (12)$$

таким чином, співвідношення зусиль в перерізі балки і кількістю очікуваних циклів буде відповідати значенням, наведеним у табл. 5.

### Експериментальні дослідження та їх аналіз

У рамках науково-дослідної роботи «Розробити рекомендації з проектування базальтобетонних конструкцій мостів і труб», договір № 127-12 від 30.07.2014 р., були виконані лабораторні дослідження із роботи базальтобетонних балок на дію статичного (ст.) та малоциклового (мц.) навантаження. Випробовувались зразки балок аналогічні до зразків у цій роботі. Результати досліджень наведені в табл. 1, в якій позначення ст. та мц. Означають типи навантаження при випробуванні: статичний метод та малоцикловий відповідно.

Середнє арифметичне значення навантаження тріщиноутворення у випробуваних зразках при дії статичного навантаження становить

$$P_{cr(сep)} = 8,440кН = 681,25кгс.$$

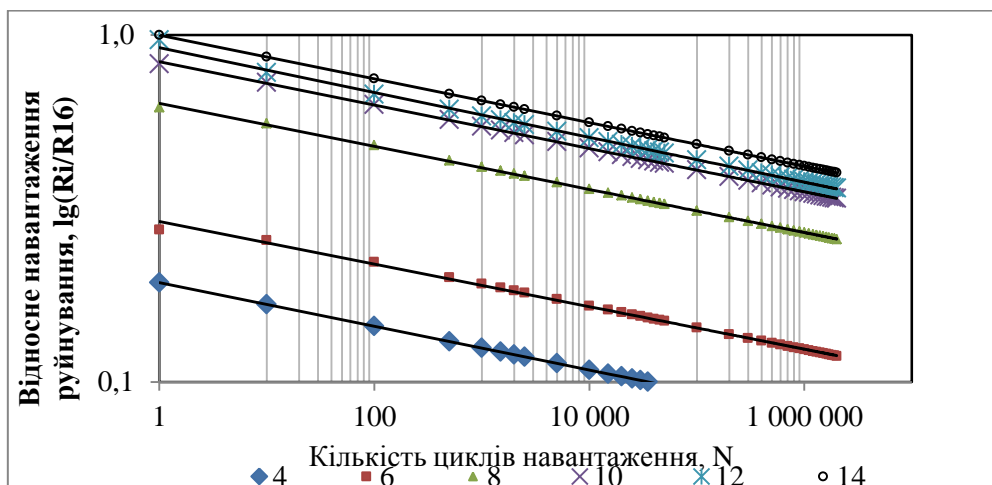


Рисунок 4 - Графічна інтерпретація випробувань на втому при різних рівнях напружено-деформованого стану (для діаметру стрижнів від 4 до 14 мм)

Середнє арифметичне значення навантаження тріщиноутворення у випробуваних зразках при дії малоциклового навантаження становить

$$P_{cr(сep)} = 8,440кН = 681,25кгс.$$

До методики випробувань зразків балок, армованих стрижнями базальтопластикової арматури, прийємо за розрахункове навантаження  $P_{cr(сep)} = 8,15кН = 831,0кгс \approx 380,0кгс$ , оскільки така величина зручна як для розрахунків, так і для виконання операцій під час проведення експериментів, адже ціна поділки на силовимірювачі випробовувальної установки складає 10 кгс.

**Таблиця 1** – Результати випробування бетонних зразків, армованих базальтопластиковою арматурою

Ø, мм	Метод навантаження	Навантаження руйнування, середнє між зразками - близнюками		Навантаження тріщиноутворення, середнє між зразками – близнюками	
		$P, кН$	$P, кгс$	$P_{cr}, кН$	$P_{cr}, кгс$
4	ст.	8,10	825,96	8,10	825,96
	мц.	8,10	825,96	8,10	825,96
6	ст.	11,50	1172,66	9,0	917,73
	мц.	13,28	1354,16	9,26	944,24
8	ст.	25,90	2641,02	8,0	815,76
	мц.	27,93	2848,02	8,01	816,78
10	ст.	34,54	3522,04	8,0	815,76
	мц.	36,04	3674,99	9,50	968,72
12	ст.	40,54	4133,86	7,50	764,78
	мц.	34,98	3566,91	8,81	898,36

Використовуючи ці дані, було визначено максимальні рівні навантаження беручи навантаження тріщиноутворення за початкове:

$$\gamma_{0,6} = 0,6 \cdot P_{cr(сep)}. \quad (13)$$

І при проходженні кожного рівня слід підвищувати навантаження на зразки на 10%, як наведено в табл. 2.

**Таблиця 2** – Залежність зміни рівнів навантаження від етапу

Номер етапу	Показник рівня навантаження	Максимальне навантаження рівня, кН	Мінімальне навантаження рівня, кН
1	$\gamma_{0,6} = 0,6 \cdot P_{cr(сep)}$	4,98	1,61
2	$\gamma_{0,66} = 0,66 \cdot P_{cr(сep)}$	5,38	1,78
3	$\gamma_{0,73} = 0,73 \cdot P_{cr(сep)}$	5,95	1,96
4	$\gamma_{0,8} = 0,8 \cdot P_{cr(сep)}$	6,52	2,15
5	$\gamma_{0,88} = 0,88 \cdot P_{cr(сep)}$	7,17	2,37

Обрана методика випробувань передбачає можливість відслідкувати степінь деградації зразка в залежності від прикладених циклів динамічного

навантаження з періодичністю у кожні 100000 циклів. Для цього відбувається зупинка динамічного навантаження, під'єднання приладів та здійснення привантаження зразка двома ступенями навантаження: перше привантаження відповідає мінімальному навантаженню у циклі, друге привантаження відповідає максимальному навантаженню у циклі. Під час цих привантажень можна відслідкувати покази приладів та зафіксувати ширину розкриття тріщин, які вже виникли.

Також результати випробувань, згідно обраною методикою, можуть дозволити порівняти роботу зразків із неметалевою базальтопластиковою арматурою на витривалість зі звичайною металевою або металевою попередньо напруженою арматурою.

При правильному дотриманні прийнятої методики випробувань за результатами експериментів можна вичислити коефіцієнт умов роботи базальтобетонних перерізів при зазначанні впливу багаторазово повторюваних навантаженнях.

Також по закінченню експериментальної частини можна буде прослідкувати залежності між:

- зміщенням стрижнів базальтопластикової арматури та кількістю циклів, які пройшов зразок;
- зміщенням стрижнів базальтопластикової арматури та рівнем навантаження на зразок;
- зміною висоти стиснутої зони у зразку від кількістю циклів, які пройшов зразок;
- зміною висоти стиснутої зони та рівнем навантаження на зразок.

За результатами випробувань згідно із обраної методики також можна встановити характер закону виникнення тріщин в базальтобетонних зразках при дії багаторазово повторюваного навантаження.

Результати теоретичного розрахунку статично-визначеної балки з однією рухомою, а іншою нерухомою опорою наведені в табл. 3.

Усі вищезгадані теоретичні напрацювання можна застосувати і для оцінки ресурсу базальтобетонних конструкцій. Якщо приймати, що у формулі (3) степінь першої половини рівняння прийнято за 16, тоді співвідношення зусиль в перерізі балки і кількістю очікуваних циклів буде відповідати значенням, наведеним у табл. 4.

**Таблиця 3** – Значення найбільших моментів та найбільших зусиль у зразках в залежності від прикладеного навантаження

Етап	Навантаження, кН	Момент в перерізі, кНм	Зусилля в перерізі, МПа
I	0,49	0,326	47,19
	1,62	1,079	155,99
II	0,78	0,520	75,12
	2,45	1,632	235,91
III	0,88	0,586	84,73
	2,70	1,795	259,50
IV	0,98	0,653	94,36
	2,94	1,958	283,09
V	1,08	0,719	103,99
	3,26	2,171	313,90

**Таблиця 4** – Залежність зусиль в перерізі та кількості прогнозованих циклів при  $\rho=0,42$

Етап	Навантаження етапу $F$ , кН	Момент в перерізі, $M$ , кНм	Зусилля в перерізі, $\sigma$ МПа	Кількість циклів, $N$
I	1,62	7,079	155,99	250 484
	0,65	0,432	62,46	
II	2,45	1,632	235,91	231 038
	0,98	0,653	94,41	
III	2,69	1,795	259,50	232 580
	1,08	0,718	103,81	
IV	2,94	1,958	283,09	233 853
	1,18	0,783	113,21	
V	3,26	2,170	313,90	232 653
	1,30	0,869	125,57	

Оскільки методикою передбачено, що для верхнього навантаження число становить частку від загального навантаження тріщиноутворення, а загальна кількість циклів, яку витримав практично кожен зразок при випробуваннях стрижнів базальтопластикової арматури складає гарантовані 1,2 мільйони циклів, то, підставивши ці значення у формулу (14), отримаємо значення нижнього рівня навантаження в етапі, яке би відповідало 0,42 від верхнього рівня навантаження. Тоді би рівень коефіцієнта асиметрії складав  $\rho=0,42$ . В такому випадку порядок цифр у прийнятій методиці випробувань набув значення як у табл 4.

$$\sigma_{\min} = \sqrt[16]{\frac{\sigma_{\max}}{N}} \quad (14)$$

Але, як вже було зазначено вище, на сьогоднішній день ще достеменно не відомо які математичні залежності зусиль та кількості циклів фігурують у теорії базальтобетону. Тому коефіцієнт асиметрії прийнято як  $\rho=0,33$ , оскільки в багатьох літературних джерелах і у діючих нормах [20] динамічний коефіцієнт



прийнятий як збільшення діючого навантаження на 30%, а саме  $(1+\mu)=1,3$ . Очевидно, що автори переслідують мету закладання додаткових відсотків міцності і надійності у споруди, що будуються.

У такому випадку, прогнозування залишкового ресурсу в зразках балок теоретично буде виглядати як наведено у табл 5.

**Таблиця 5** – Залежність зусиль в перерізі та кількості прогнозованих циклів при  $\rho=0,33$

Етап	Навантаження етапу, $F$ , кН	Момент в перерізі, $M$ , кНм	Зусилля в перерізі, $\sigma$ МПа	Кількість циклів, $N$
I	1,62	1,08	155,99	203 901 839
	0,49	0,33	47,182	
II	2,45	1,63	235,91	89 696 896
	0,78	0,52	75,106	
III	2,70	1,80	259,50	59 924 234
	0,88	0,59	84,734	
IV	2,94	1,96	283,09	43 095 407
	0,98	0,65	94,363	
V	3,26	2,17	313,90	47 511 178
	1,08	0,72	103,992	

### Висновки

У рамках виконання роботи було виготовлено 5 серій зразків сумарною кількістю в 10 бетонних балок армованих стрижнями різних діаметрів неметалевої базальтопластикової арматури.

На основі математичної моделі оцінювання надійності неметалевої стрижневої арматури та отриманих даних про якість виготовленого бетону розроблено методику випробувань, яка дозволяє значно скоротити довготривалі у часі випробування на витривалість, а також скоротити фінансові витрати на дослідження надійності мостових елементів.

### Література

1. Експлуатація і реконструкція мостів / [Н. Є. Страхова, В. О. Голубєв, П. М. Ковальов та ін.]. – К.: НТУ, 2002. – 408 с.
2. Мости: конструкції та надійність / [Й. Й. Лучко, П. М. Коваль, П. М. Корнієв та ін.]. – Львів, 2005. – 989 с.
3. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії: ДСТУ Б В.2.6-145. – [чинний від 26.10.2010] – К.: Мінрегіонбуд, 2010. – (Національний стандарт України).
4. ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1R-06 – ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2006. – 44 p.
5. Використання неметалевої композитної арматури для армування бетонних конструкцій / Ю.А. Клімов, Ю.А. Вітковський, О.С. Солдатченко // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – К.: – 2011. – Вип. 42. – С. 13-17.
6. Клімов Ю. А. Экспериментальные исследования прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных композитной базальтопластиковой арматурой / Ю. А.

Климов, А. С. Солдатченко, С. А. Васильчишина // Бетон и железобетон в Украине. - 2011. - №2. - с. 7 - 10.

7. Лучко Й. Й. Перспектива підвищення довговічності плит проїзної частини мостів при використанні базальту / Й. Й. Лучко, Т. І. Коваль. // Каменяр. – 2012. – №9. – С. 443–450.

8. Коваль П. М. Ефективність використання базальтопластикової арматури при армуванні плити проїзної частини моста / П. М. Коваль, О. Я. Гримак, Т. І. Коваль // Вісник державної академії будівництва та архітектури – 2016 - №61 – С.193 – 197.

9. Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу : ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012. – [чинний від 1 квітня 2014 р.] – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012. – (Національний стандарт України).

10. Рекомендації із проектування базальтобетонних конструкцій мостів і труб : Р В.2.3-03450778-846:2014. – [чинний від 11.11.2014 р.] – К.: ДП «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), 2014. – (Рекомендації).

11. Гамеляк І.П. Математична модель втомної міцності неметалевої стрижневої арматури / І. П. Гамеляк, Т. І. Коваль. // Вісник НТУ. – 2015. – С. 162–168.

12. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування : ДБН В.2.3-14:2006. – [чинний від 6 травня 2006 р.] – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2006. – (Державн будівельні норми України).

13. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками : ДСТУ Б В.2.7-214:2009. – [чинний від 22.12.2009 р.] - К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – (Держвані будівельні норми України).

14. Мельник И.В. Выносливость, трещиностойкость и деформативность железобетонных изгибаемых элементов при многократно повторяющихся нагрузениях: дис. канд. техн. наук – Львов, 1989. – 214 с.

15. Радовский Б.С., Супрун А.С. Конструирование дорожных одежд для многоосных транспортных средств большой грузоподъемности. - Обзорная информация ЦБНТИ Минавтодора РСФСР, № 3, 1985. - 60 с.

16. Радовский Б.С. Влияние нагрузок от автотранспортных средств на долговечность дорожных одежд. / Автомобильные дороги, № 10, 1984. – С. 6 - 8.

17. Øielking J., Roberts F. Tire contact pressure and its effect on pavement strain. / Journ. Transp. Eng., 1987. - P. 56 - 71.

18. Sullivan M., Trends in truck transportation - issues pertaining to track-pavement interaction. / SAE Techn. Pap. Ser. – 1988, № 881848. – P. 79 - 86.

19. The AASHO Road Test. Report 5. Pavements research. Spec. Report 61 E, Publ. 954. - Washington, 1962. – 351 p.

20. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи : ДБН В.1.2-15:2009 – [чинний від 11.11.2009 р.] - К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2009. – (Національний стандарт України).

21. Гамеляк І.П. Про визначення характеристик втомленості дисперсноармованного асфальтобетону // Автомоб. дороги і дор. буд-во. - К.: Вип. 51, 1993. - С. 59 - 62.

**Рецензенти:**

Марчук О.В., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.

Кузьминець М. П., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.

**Reviewers:**

Marchuk O.V., Dr. Tech. Sci., National Transport University.

Kuzminets M.P., Dr. Tech. Sci., National Transport University.

Стаття надійшла до редакції: **14.12.2016 р.**