

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21:625.1.09-027.45

В. І. СОЛОМКА\*

\* Кафедра «Мости», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 067 584 97 35, ел. пошта solomka.valya@rambler.ru, ORCID 0000-0003-0567-6483

### ЗАСТОСУВАННЯ ВУГЛЕВОЛОКНА В ЯКОСТІ ЗОВНІШНЬОГО АРМУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ

**Мета.** Дослідження ефективності застосування вуглецевого волокна в якості зовнішнього армування для підвищення вантажопідйомності залізобетонних прогонових будов залізничних мостів, що знаходяться тривалий час в експлуатації. **Методологія.** Для досягнення поставленої мети виконано визначення вантажопідйомності залізобетонних прогонових будов залізничних мостів методом класифікації. Для підвищення отриманих класів в якості зовнішнього армування застосоване вуглецеве волокно і виконано перерахунок. **Результат.** В результаті виконаного дослідження отримані класи залізобетонних прогонових будов залізничних мостів після підсилення їх вуглецевим волокном і встановлена ефективність такого підсилення. **Наукова новизна.** Отримані в роботі результати відображають ефективність застосування вуглецевого волокна для підсилення залізобетонних прогонових будов залізничних мостів і інженерних споруд, що працюють в умовах змінних навантажень. **Практична значимість.** Питання, розглянуті в статті, дозволять більш ефективно застосовувати вуглецеве волокно для підсилення прогонових будов залізничних мостів при виконанні капітального ремонту чи реконструкції і таким чином підвищувати вантажопідйомність споруд, що знаходяться тривалий час в експлуатації.

**Ключові слова:** залізобетонна прогонова будова; вуглецеве волокно; зовнішнє армування; надійність; довговічність, вантажопідйомність

#### Вступ

Згідно [1] вуглецеве волокно є композитним матеріалом, що складається з тонких ниток діаметром від 5 до 15 мкм, які утворені переважно атомами вуглецю. Атоми вуглецю об'єднані в мікроскопічні кристали, які вирівняні паралельно один одному. Вирівнювання кристалів надає волокну більшої міцності на розтяг.

Вуглецеве волокно є дуже жорстким відносно його маси і використовується, як правило, для армування ділянок конструкцій, де необхідна підвищена міцність і жорсткість. Проте поряд із цим воно має дуже низьку стійкість до ударних навантажень. Вуглецеве волокно відрізняється високою пружністю і механічною міцністю, стійкістю до дії високих температур, хімічних реагентів та ультрафіолетового випромінювання.

Спектр застосування досить широкий, це усі види залізобетонних будівельних конструкцій,

а також мостові споруди під автомобільне та залізничне навантаження.

Проте питання застосування вуглецевого волокна в якості зовнішнього армування для залізобетонних прогонових будов залізничних мостів на сьогоднішній день залишається не достатньо вивченим із-за нечастого застосування, тому тема даної статті є актуальною.

#### Мета

Метою даної статті є дослідження вантажопідйомності залізобетонних прогонових будов залізничних мостів при підсиленні їх елементів стрічками вуглецевого волокна, яке застосовується в якості зовнішнього армування.

#### Методика

Для отримання поставленої мети виконано оцінку вантажопідйомності прогонової будови із попередньо напруженого залізобетону методом класифікації [3, 5, 7, 8], що експлуатується

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

на одноколіїній ділянці однієї із залізниць України. Переріз прогонової будови наведено на рис. 1. Прогонова будова із попередньо напруженого залізобетону, двоблочна, без діафрагм. Розрахункова довжина  $\ell_p = 22,9$  м, повна довжина  $\ell_n = 23,6$  м. Балки прогонової будови виготовлені на полігоні за типовим проектом № 7881 Лентрансмостпроекту у 1957 р. під навантаження Н8. Бетон марки 400, що відповідає класу В30.

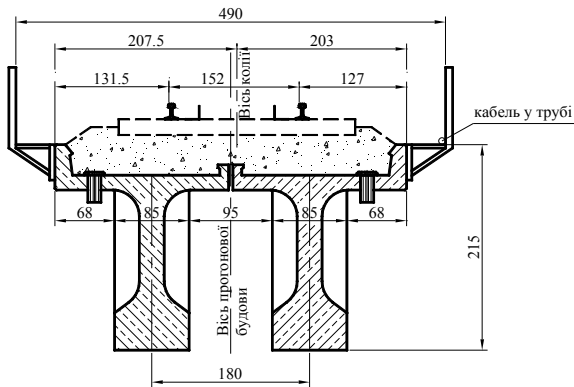


Рис. 1. Переріз залізобетонної прогонової будови за типовим проектом № 7881 Лентрансмостпроекту

В якості попередньо напруженої арматури застосовані прямолінійні, двопетлеві канати із високоміцного дроту. У кожній балці поставлено по 16 канатів, які мають по 32 дротини діаметром 5 мм, виготовлені на верстаті конструкції «МС-1» і розташовані в два ряди у нижньому поясі балки. Натяг виконано за технологією МПТУ. В якості розподільчої застосована гладка арматура класу АІ і періодичного профілю класу АІІ. Арматурне креслення балки прогонової будови наведено на рис. 2.

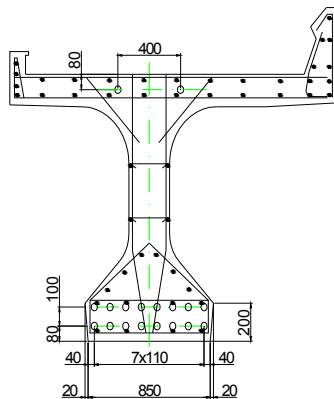


Рис. 2. Арматурне креслення балки

Основні дані для визначення вантажопідйомності методом класифікації:

- розрахункова довжина прогонової будови –  $\ell_p = 22,9$  м;
- повна довжина прогонової будови –  $\ell_n = 23,6$  м;
- відстань між осями балок –  $b = 1,8$  м;
- висота балки –  $h_0 = 0,35$  м;
- зміщення осі колії відносно осі прогонової будови –  $e_1 = 5,0$  см,  $e_2 = 2,0$  см;
- фактична міцність бетону –  $R_f = 37,02$  МПа;
- розрахунковий опір бетону:
  - на стиснення  $R_b = 13,19$  МПа;
  - на розтягнення  $R_{bt} = 0,96$  МПа;
- розрахунковий опір попередньо напруженої арматури  $R_p = 1000$  МПа;
- розрахункові опори арматури періодичного профілю (АІІ):
  - на розтягнення  $R_{sc} = 240$  МПа;
  - на стиснення  $R_s = 240$  МПа.
- розрахункові опори гладкої арматури (АІ):
  - на розтягнення  $R_{sc} = 190$  МПа;
  - на стиснення  $R_s = 190$  МПа.
- модуль пружності попередньо напруженої арматури  $E_p = 1,77 \cdot 10^5$  МПа;
- модуль пружності звичайної арматури  $E_s = 2,06 \cdot 10^5$  МПа;
- модуль пружності бетону  $E_b = 30,7 \cdot 10^3$  МПа;
- відношення модулів пружності  $n_{1p} = 5,76$ ;
- $n_{1s} = 6,71$ ;
- коефіцієнти надійності:
  - до постійних навантажень  $n_p = 1,10$ ;
  - до ваги баласту із частинами колії  $n_b = 1,20$ ;
  - до тимчасового навантаження  $n_v = 1,15$ .
- динамічний коефіцієнт до еталонного навантаження  $1 + \mu = 1,35$ ;
- коефіцієнт уніфікації результатів класифікації  $\psi = 0,925$ ;
- частка тимчасового навантаження, що припадає на одну балку  $\varepsilon_m = 0,519$ ;  $\varepsilon_Q = 0,522$ ;
- постійне навантаження  $p = 80,08$  кН/м.

За результатами обстеження мосту, на якому встановлені вказані прогонові будови, ще у 2006 році була виявлена корозія і розрив окре-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

мих дротин попередньо напруженої арматури в розтягнутій зоні.

На момент наступного обстеження у 2011 році ніяких дій по усуненню вказаного дефекту чи підсиленню прогонової будови виконано не було і на сьогоднішній день міст залишається в незадовільному стані. Тому оцінка вантажопідйомності була виконана в припущенні, що процес корозії продовжує розвиватись і з часом може привести до повної втрати балками несучої здатності.

Виконувався розрахунок головної балки прогонової будови на міцність за згинальним моментом в середині прогону. Розглядалися наступні випадки:

*Випадок 1.* В припущенні, що на сьогоднішній день відбулася корозія попередньо-напруженої арматури для 6 пучків першого ряду і 2 крайніх пучків другого ряду – 1 мм; 1 пучок нижнього ряду – 1,5 мм; 1 пучок корозія 1,5 мм і 5 дротин розірваних.

*Випадок 2.* В припущенні, що на сьогоднішній день відбулася корозія попередньо-напруженої арматури на 1 мм по всій довжині прогонової будови (корозія 36 %), тобто 6 пучків першого ряду і 8 пучків другого ряду – 1

мм; 1 пучок нижнього ряду – 1,5 мм; 1 пучок корозія 1,5 мм і 5 дротин розірваних;

*Випадок 3.* В припущенні, що на сьогоднішній день відбулася корозія попередньо-напруженої арматури на 1,5 мм по всій довжині прогонової будови (корозія 49 %), тобто 7 пучків першого ряду і 8 пучків другого ряду – 1 мм; 1 пучок корозія 1,5 мм і 5 дротин розірваних.

В якості зовнішнього армування для підсилення розтягнутого поясу балки прогонової будови застосовуються стрічки із вуглецевого волокна. Для розрахунків попередньо задаються початкові величини композитного матеріалу. Для прикладу підсилення застосовується композитний матеріал Sika® CarboDur®M ( $E = 210000 \text{ Н/мм}^2$ ,  $b = 120 \text{ мм}$ ,  $t = 1,4 \text{ мм}$ ,  $A_f = 168 \text{ мм}^2$ ). Підсилюється балка в розтягнутій зоні ребра. На заздалегідь підготовлену поверхню бетону наклеюються 7 стрічок із вуглецевого волокна. Виконується розрахунок вантажопідйомності згідно [3] з урахуванням положень [10.]

Згідно [3 і 10] висота стиснутої зони бетону з урахуванням підсилення визначається за формулою (1)

$$x = \frac{R_s A_s + R_p A_p + R_f A_f - R_{sc} A'_s - \sigma_{pc} A'_p - R_b (b'_f - b) h'_f}{R_b b}, \quad (1)$$

де  $R_f$  – розрахунковий опір розтягу вуглецевого волокна;  $A_f$  – площа підсилення стрічками із вуглецевого волокна. Усі інші пояснення позначень у формулі (1) наведені у [3].

При порівнянні висоти стиснутої зони  $x$  з висотою плити  $h'_f$  розглядаються два випадки:  $x \leq h'_f$  і  $x \geq h'_f$ .

Якщо  $x \leq h'_f$  то граничний момент  $M_{гр}$  визначається за формулою (2)

$$M = R_b b'_f x (h_0 - 0,5x) + R_s A'_s (h_0 - a'_s) + \sigma_{pc} A'_p (h_{01} - a'_p) - R_f A_f a_f \quad (2)$$

де  $a_f$  – відстань від центру ваги арматури із вуглецевого волокна до центру ваги нижньої попередньо напруженої арматури балки прогонової будови. Усі інші пояснення позначень у

формулі (2) наведені у [3]. Якщо  $x \geq h'_f$  то  $M_{гр}$  визначається за формулою (3). Усі інші пояснення позначень у формулі (3) наведені у [3]

$$M = R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_b (b'_f - b) h'_f (h_0 - 0,5h'_f) + R_s A'_s (h_0 - a'_s) + \sigma_{pc} A'_p (h_{01} - a'_p) - R_f A_f a_f \quad (3)$$

### Результати

В результаті виконаних розрахунків отримані класи прогонової будови до підсилення і після підсилення стрічками із вуглецевого волокна (табл. 1.).

Згідно виконаних розрахунків встановлено, що застосування стрічок із вуглецевого волокна в якості зовнішнього армування дозволяє підвищити вантажопідйомність залізобетонних прогонових будов і можливе до застосування як

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

у прогонових будов із звичайного залізобетону так і попередньо напруженого.

Таблиця 1

## Результати класифікації

Клас при розрахунку на міцність		
Випадки розрахунку	До підсилення	Після підсилення
Випадок 1	11,35	15,7
Випадок 2	9,04	13,3
Випадок 3	6,68	11,0

При застосуванні композитних матеріалів, як то стрічки із вуглецевого волокна, в якості зовнішнього армування для підсилення балок прогонових будов із залізобетонну залізничних мостів необхідно дотримуватися наступних рекомендацій:

- Виконати натурне обстеження конструкцій прогонових будов і встановити фактичний експлуатаційний стан споруд;
- Виконати попередні розрахунки для застосування вуглецевого волокна в якості зовнішнього армування;
- Перед застосуванням композитних матеріалів виконати ремонт корошованої арматури, якщо такий дефект був виявлений при обстеженні;
- Виконувати захист вуглецевого волокна від прямого попадання сонячних променів і ін.

На сьогодні застосування композитних матеріалів в якості зовнішнього армування для підсилення залізобетонних прогонових будов залізничних мостів не має широкого розповсюдження. Частіше за все прогонові будови, які мають дефекти, що знижують їх вантажопідйомність, експлуатуються до вичерпання несучої здатності без виконання відповідного ремонту.

Якщо розглядати нормативну базу по застосуванню композитних матеріалів для підсилення залізобетонних конструкцій будівель і споруд, то в Україні відсутні ДБН чи інші документи, які б регламентували порядок їх розрахунку та застосування. На сьогодні питання розробки і впровадження такого документу є актуальним.

Також постає питання про необхідність перегляду «Правил визначення вантажопідйомності балкових залізобетонних прогонових будов залізничних мостів» [3]. В указаному документі наведені класичні способи підсилення прогоно-

вих будов залізобетонних залізничних мостів шляхом додавання додаткової арматури у розтягнуту зону і то тільки для конструкцій із звичайною арматурою, а також підсилення за допомогою додаткових елементів та зміною статичної схеми. Як правило усі ці види підсилення застосовуються дуже рідко. Тому необхідно переглянути документ і внести корективи з урахуванням сучасних матеріалів та методів підвищення несучої здатності і вантажопідйомності вказаних споруд.

## Висновки

В результаті виконаних розрахунків по оцінці вантажопідйомності прогонових будов із попередньо напруженого залізобетону залізничного одноколіїного мосту встановлено, що підсилення елементів балки прогонової будови стрічками із вуглецевого волокна дозволяє підвищити клас прогонової будови в середньому на 4,5 одиниці.

Тому застосування в якості зовнішнього армування стрічок із вуглецевого волокна для залізобетонних прогонових будов залізничних мостів є ефективним.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вікіпедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://uk.wikipedia.org/wiki/Вуглецеве\\_Волокно](https://uk.wikipedia.org/wiki/Вуглецеве_Волокно). – Назва з екрану.
2. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – На заміну СНиП 2.03.01-84\* ; надано чинності 2011-06-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
3. ЦП-0085. Правила визначення вантажопідйомності балкових залізобетонних прогонових будов залізничних мостів [Текст]. – Надано чинності 2002-01-17. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 404 с.
4. ДБН В.3.1-1-2002. Експлуатація конструкцій та інженерного обладнання будівель і споруд та систем життєзабезпечення. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій і основ промислових будинків та споруд [Текст]. – Надано чинності 2003-07-01. – Київ : Держбуд України, 2003. – 82 с.
5. Солдатов, К. І. Визначення класів залізничних залізобетонних прогонових будов мостів за величиною пружних прогинів / К. І. Солдатов, М. К. Журбенко, С. В. Ключник, В. А. Мірошник [Текст] // Мости та тунелі: теорія, дослідження,

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- практика. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 3. – С. 187-193.
6. Соломка, В. И. Учет влияния дефектов на долговечность железобетонных мостов при их эксплуатационной оценке [Текст] / В. И. Соломка // Строительство. Материаловедение. Машиностроение : сб. научн. тр. ПГАСА. – Днепропетровск : ПГАСА, 2003. – Вып. № 25. – С. 208-212.
  7. Тарасенко, В. П. Аналіз вантажопідйомності залізобетонної прогонової будови під суміщену їзду моста, що експлуатується, з розташуванням автопроїзду на консолях за межами головних балок [Текст] / В. П. Тарасенко, В. І. Соломка // Дороги і мости. – Київ, 2007. – Вип. 7. – Том II. – С. 236-241.
  8. Соломка, В. І. Оцінювання технічного стану залізобетонних залізничних мостів [Текст] / В. І. Соломка, А. В. Гармаш, О. В. Горбова // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 39. – С. 32-36.
  9. Бокарев, С. А. Усиление железобетонных элементов мостов полимерными композиционными материалами без остановки движения [Электронный ресурс] / С. А. Бокарев, К. В. Кобелев, В. А. Слепец // Наукоедение : интернет-журнал. – 2014. – Вып 5(24). – С. 1-17. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/20KO514.pdf>
  10. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования [Текст]. – Введ. 2014-09-01. – Москва : Мин. стр-ва и жил.-ком. хоз-ва Российской Федерации, 2015. – 51 с.
  11. Применение системы внешнего армирования FibAgm на основе углеродных волокон для ремонта железобетонных конструкций зданий и сооружений. Примеры выполненных объектов [Электронный ресурс]. – ПРЕПРЕГ-СКМ. – Режим доступа : <http://www.hccomposite.com/upload/iblock/38e/38eb7b6ab9a95448da43f9442a5c3560.pdf>
  12. Yungon Kim, Kevin Quinn, Neil Satrom, Jose Garcia, Wei Sun, Wassim M. Ghannoum, James O. Jirsa Shear Strengthening of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets and Anchors : CTR Technical Report : 0-6306-1. October 2011; Rev. February 2012. 301 p. Available at: [http://www.utexas.edu/research/ctr/pdf\\_reports/0\\_6306\\_1.pdf](http://www.utexas.edu/research/ctr/pdf_reports/0_6306_1.pdf)
  13. Vieira M. M., Santos A. R. S., Montalverne A. M., Bezerra L. M., Montenegro L. C. S., Cabral A. E. B. Experimental analysis of reinforced concrete beams strengthened in bending with carbon fiber reinforced polymer. Rev. IBRACON Estrut. Mater, 2016, vol. 9, no. 1. doi: 10.1590/S1983-41952016000100008
  14. Mykolas Daugevičius, Juozas Valivonis, Gediminas Marčiukaitis Deflection analysis of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer under long-term load action. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2012, vol. 13, issue 8, pp 571-583.
  15. Muhammad Afaq Javed, Muhammad Irfan, Sumera Khalid, Yulong Chen, Saeed Ahmed An experimental study on the shear strengthening of reinforced concrete deep beams with carbon fiber reinforced polymers. Structural Engineering. KSCE Journal of Civil Engineering, 05 February 2016, pp. 1-9.

В. И. СОЛОМКА\*

\* Кафедра «Мосты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (067) 584 97 35, эл. почта [solomka.valya@rambler.ru](mailto:solomka.valya@rambler.ru), ORCID 0000-0003-0567-6483

## ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕВОЛОКНА В КАЧЕСТВЕ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

**Цель.** Исследование эффективности применения углеродного волокна в качестве внешнего армирования для повышения грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, находящихся длительное время в эксплуатации. **Методология.** Для достижения поставленной цели выполнено определение грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов методом классификации. Для повышения полученных классов в качестве внешнего армирования применено углеродное волокно и выполнен перерасчет. **Результат.** В результате выполненного исследования получены классы

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов после усиления их углеродным волокном и установлена эффективность такого усиления. **Научная новизна.** Полученные в работе результаты отражают эффективность применения углеродного волокна для усиления железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов и инженерных сооружений, работающих в условиях переменных нагрузок. **Практическая значимость.** Вопросы, рассмотренные в статье, позволят более эффективно применять углеродное волокно для усиления пролетных строений железнодорожных мостов при выполнении капитального ремонта или реконструкции и таким образом повышать грузоподъемность сооружений, которые находятся длительное время в эксплуатации.

*Ключевые слова:* железобетонное пролетное строение; углеродное волокно; внешнее армирование; надежность; долговечность, грузоподъемность

VALENTINA SOLOMKA\*

\* Bridges Department, Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 584 97 35, e-mail solomka.valya@rambler.ru, ORCID 0000-0003-0567-6483

## APPLICATION AS AN EXTERNAL CARBON FIBER REINFORCEMENT FOR INCREASE CAPACITY CONCRETE SPAN RAILWAY BRIDGES

**Purpose.** The study of the effectiveness of carbon fiber as an external reinforcement to enhance the capacity of reinforced concrete spans railway bridges that are in operation for a long time. **Methodology.** To achieve this goal fulfilled determining carrying capacity of reinforced concrete spans railway bridges by classification. To increase derived classes as external reinforcement used carbon fiber and made UAH. **Findings.** As a result of the study received classes of reinforced concrete spans railway bridges after amplification of carbon fiber and established the effectiveness of the reinforcement. **Originality.** Obtained in the results reflect the effectiveness of the carbon fiber reinforcement for reinforced concrete spans of railway bridges and engineering structures, operating under conditions of variable loads. **Practical value.** The issues discussed in the article, allow more effective use of carbon fiber to strengthen spans railway bridges in the performance of major repairs or reconstruction and thus enhance the capacity of structures that are in use for a long time.

*Keywords:* reinforced concrete spans; carbon fiber; external reinforcement; reliability; durability, capacity

### REFERENCES

1. *Vikipediya*. Available at: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Vugleceve\\_volokno](https://uk.wikipedia.org/wiki/Vugleceve_volokno).
2. *DBN B.2.6-98:2009. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia* [State Standard B.2.6-98:2009. Construction of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures. Substantive provisions], Kyiv, Minrehionbud Ukrayiny Publ., 2011. 71 p.
3. *TsP-0085. Pravyla vyznachennia vantazhopidionnosti balkovykh zalizobetonnykh prohonovykh budov zaliznychnykh mostiv* [Rules of carrying capacity of reinforced concrete beam spans railway bridges]. Dnipropetrovsk, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan Publ., 2003, 404 p.
4. *DBN B.3.1-1-2002. Ekspluatatsiia konstruktsii ta inzhenernoho obladnannia budivel i sporud ta system zhyttiezabezpechennia. Remont i pidsylennia nesuchykh i ohorodzhivalnykh budivelnykh konstruktsii i osnovnykh promyslovykh budynkiv ta sporud* [Operating designs and engineering equipment of buildings and structures and life support systems. Repair and strengthening of bearing and protecting structures and foundations of industrial buildings and structures]. Kyiv, Derzhbud Ukrayiny Publ., 2003. 82 p.
5. Soldatov K. I., Zhurbenko M. K., Kliuchnyk S. V., Miroshnyk V. A. Vyznachennia klasiv zaliznychnykh zalizobetonnykh prohonovykh budov mostiv za velychynoiu pruzhnykh prohyniv [Determining the class of the railway reinforced concrete spans of the bridges by considering the magnitude of the elastic sags]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka – Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 2012, issue 3, pp. 187-193.
6. Solomka V. I. Uchet vlianiya defektov na dolgovechnost zhelezobetonnykh mostov pri ikh ekspluatatsionnoy otsenke [Resistance of materials]. *Sbornik nauchnykh trudov Pridneprovskoy gosudarstvennoy akademii stroitelstva i arkhitektury "Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie"* [Proc. Of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture "Building. Materials Science. Engineering"]. Dnepropetrovsk, 2003, vol. 25. – pp. 208-212.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

7. Tarasenko V. P., Solomka V. I. Analiz vantazhopidomnosti zalizobetonnoi prohonovoi budovy pid sumishchenu yizdu mosta, shcho ekspluatuietsia, z rozdashuvanniam avtoproizdu na konsoliakh za mezhamy holovnykh balok [Analysis capacity reinforced concrete span road-cum-rail bridge, with auto floor on consoles outside the main beams]. *Dorohy i mosty – Roads and Bridges*, 2007, vol. 7, tom II, pp. 236-241.
8. Solomka V. I., Harmash A. V., Horbova O. V. Otsiniuvannia tekhnichnoho stanu zalizobetonnykh zaliznychnykh mostiv [Evaluation of the technical state of ferroconcrete railway bridges]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue. 39, pp. 32-36.
9. Bokarev S. A., Kobelev K. V., Slepets V. A. Usilenie zhelezobetonnykh elementov mostov polimernymi kompozitsionnymi materialami bez ostanovki dvizheniya [Reinforced concrete bridge parts strengthening using the polymer composites without the traffic stop]. *Elektronnoe nauchnoe izdanie "Naukovedenie" – Electronic scientific publication of "Naukovedenie"*, 2014, vol. 5(24), pp. 1-7. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/20KO514.pdf>
10. SP 164.1325800.2014. Usilenie zhelezobetonnykh konstruksiy kompozitnymi materialami. Pravila proektirovaniya [SP 164.1325800.2014. Strengthening of reinforced concrete structures with composite materials. Design rules]. Moscow, Ministerstvo stroitelstva i zhilishchno-komunalnogo khozyaystva Rossiyskoy federatsii, 2015. 51 p.
11. *Primenenie sistemy vneshnego armirovaniya FibArm na osnove uglerodnykh volokon dlya remonta zhelezobetonnykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy*. Primery vypolnennykh obektov [Electronic resource]. Available at: <http://www.hccomposite.com/upload/iblock/38e/38eb7b6ab9a95448da43f9442a5c3560.pdf>
12. Yungon Kim, Kevin Quinn, Neil Satrom, Jose Garcia, Wei Sun, Wassim M. Ghannoum, James O. Jirsa *Shear Strengthening of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets and Anchors* : CTR Technical Report : 0-6306-1. October 2011; Rev. February 2012. 301 p. Available at: [http://www.utexas.edu/research/ctr/pdf\\_reports/0\\_6306\\_1.pdf](http://www.utexas.edu/research/ctr/pdf_reports/0_6306_1.pdf)
13. Vieira M. M., Santos A. R. S., Montalverne A. M., Bezerra L. M., Montenegro L. C. S., Cabral A. E. B. *Experimental analysis of reinforced concrete beams strengthened in bending with carbon fiber reinforced polymer*. Rev. IBRACON Estrut. Mater, 2016, vol. 9, no. 1. doi: 10.1590/S1983-41952016000100008
14. Mykolas Daugevičius, Juozas Valivonis, Gediminas Marčiukaitis Deflection analysis of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer under long-term load action. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2012, vol. 13, issue 8, pp 571-583.
15. Muhammad Afaq Javed, Muhammad Irfan, Sumera Khalid, Yulong Chen, Saeed Ahmed An experimental study on the shear strengthening of reinforced concrete deep beams with carbon fiber reinforced polymers. *Structural Engineering. KSCE Journal of Civil Engineering*, 05 February 2016, pp. 1-9.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна), д.т.н., проф. А. І. Лантухом-Лященко (Україна).

Надійшла до редколегії 10.12.2015.

Прийнята до друку 21.12.2015.