
МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.271

В. Г. ВИСКРЕБЕНЦЕВ^{1*}, К. І. СОЛДАТОВ^{2*}

^{1*} Галузева науково-дослідна лабораторія штучних споруд, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 33 58 12

^{2*} Каф. «Мости», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (096) 527 26 01, ел. пошта kim-kim@i.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО ВОЛОКНА У ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВАХ ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ

Мета. У даній роботі представлено використання вуглецевого волокна у якості стержнів арматури для армування залізобетонної прогонової будови довжиною 13,5 м порівняно з прогоною будовою аналогічної довжини, але з використанням звичайної арматури. **Методика.** Розрахунок ведеться за методикою, описаною у методичних вказівках при проектуванні та розрахунку залізобетонних прогонових будов з каркасно-зварної арматури. **Результати.** На основі приведеного дослідження була встановлена ефективність використання композитної арматури у якості робочої для армування нею прогонової будови. **Наукова новизна.** Доведена можливість використання композитної арматури у якості елемента, що працює на розтяг у прогонової будови. **Практична значимість.** Встановлення арматури такого типу дозволить знизити вартість прогонової будови та збільшити її термін експлуатації.

Ключові слова: вуглецеве волокно; каркасно-зварна арматура; композитна арматура

Вступ

Зараз у будівництві активно впроваджуються нові будівельні матеріали. Одним з таких матеріалів є композитна полімерна арматура на основі борних та вуглецевих волокон. Найяскравішими прикладами є проекти пішохідних мостів у країнах Європи, таких, як Нідерланди (Aberfeldy Footbridge) та Іспанія. Також такі проекти зустрічаються і у Росії, наприклад міст Багратіон у Москві та міст поблизу станції «Чертаново». На сьогоднішній день композитні будівельні матеріали застосовуються і в Україні, але великою проблемою залишається недосконалість нормативних документів щодо рекомендацій до проектування штучних споруд із застосуванням таких матеріалів.

Мета

Ця робота присвячена дослідженню можливості використання композитної полімерної арматури у якості робочої для типових прогонових будов, які широко застосовуються для будівництва мостів на залізницях України.

Методика

Розрахунок прогонової будови проводиться за методикою, розробленою на основі ДБН та відображена у методичних вказівках до проектування залізобетонної прогонової будови з каркасно-зварної арматури [1].

Спочатку задамося вихідними даними:

- 1) клас тимчасового навантаження – С14 ($K = 14$);
- 2) розрахунковий прогін – $l_p = 12,8$ м;
- 3) клас бетону – В25;
- 4) клас арматури (плита баластного корита та ребро балки) – композитна арматура на основі вуглецевих волокон;
- 5) початкова товщина плити баластового корита – 15 см.

Вихідні параметри зображено на ескізі перерізу балки на рис. 1.

Далі визначаються згинальні моменти та поперечні сили, які діють на зовнішню та внутрішню консолі. Також ведеться підбір перерізів плити баластового корита.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

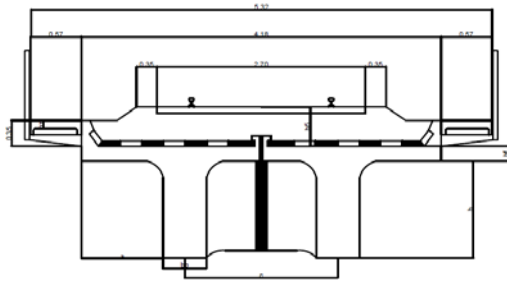


Рис. 1. Ескіз поперечного перерізу прогонової будови

Результати наведені у табл. 1.

Після перевірок параметрів плити баластового корита результати заносимо до табл. 2.

Після розрахунку та уточнення розмірів плити баластового корита переходимо до проектування та розрахунку головної балки.

Результати розрахунку наведені у табл. 3.

Таблиця 1

Основні характеристики плити баластного корита

Параметр	Арматура (метал)	Композитна арматура
Робоча висота h_0 , см	12,62	8,46
Товщина плити (повна), h_f , см	16	11
	$d_s = 1,2$ см	$d_s = 0,8$ см
Площа робочої арматури, A_s	12,17	5,23
Кількість стержнів, n_s	12	12
Площа робочої арматури (уточнена)	13,57	6,03

Таблиця 2

Основні перевірки плити баластного корита

Параметр	Арматура (метал)	Композитна арматура
Висота стиснутої зони бетону x , см	2,09	3,95
Умова: $(x / h_0) \leq \varepsilon_y$	$0,156 \leq 0,66$	$0,46 \leq 0,482$
Умова міцності бетону	3351,42	3391,67
Перевірка по поперечній силі за R_b	1365	1365
Перевірка по поперечній силі за R_{bt}	115,8	154,3
Висота стиснутої зони бетону, визначена за формулами пружного тіла без урахування розтягнутої зони бетону	6,23	3,5
Перевірка напруження у стисненому бетоні	$0,61 \leq 1,05$	$0,165 \geq 1,05$
Перевірка напруження у розтягнутій арматурі	$a_u = 2,6$ см $10,07 \leq 14,08$	$29,15 \leq 76,7$
Напруга у крайніх стержнях, кН/см^2	10,82	45,47
Умова не розкриття тріщин	$6,14 \cdot 10^{-6}$ см	0,0024 см

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблиця 3

Основні розрахунки ребра головної балки

Параметр	Арматура (метал)	Композитна арматура
Робоча висота балки, см	95,5	95,5
Необхідна робоча висота таврового перерізу h_0	114,13	95,24
Розрахункова ширина полки стиснутого поясу b'	209	209
Середня приведена товщина плити баластного корита, см h'_f	25	25
Перевірка положення нейтральної вісі $M_{\max} = 415880$ Вісь знаходиться в плиті	563778	562012
Площа арматури із розрахунку на міцність $A_s^{\text{міц}}$	169,8	65,8
Підбір кількості стержнів та уточнення A_s Візьмемо арматуру діаметром 40 мм А-III та вуглецеве волокно діаметром 24 мм	14 стержнів 175,924 см ²	16 стержнів 72,4 см ²
Умова міцності:	474028	522314
Знаходимо нейтральну вісь через висоту стисненого бетону r, s	125,25 11782,82	88,23 5828
x' вісь знаходиться у ребрі	40,29	28,44
Момент інерції приведенного до бетону поперечного перерізу балки I_{red}	29582600	9885989
Максимальні стискальні напруги у бетоні σ_b	0,756	0,926
Максимальні розтягувальні напруги у робочій арматурі σ_s	13,1	46,13
Міцність по стисненому бетону між нахиленими тріщинами Q	2312	2829
Поперечне зусилля в бетоні стиснутої зони ребра балки над кінцем нахилоного перерізу Q_b	495,9	503,54
Перевірка поперечного перерізу балки по похилій тріщині за міцністю по поперечній силі Q	3042,4	3336,8
Умова міцності на згинальний момент	423518	453123
Напруга у крайніх стержнях, σ_s кН/см ²	1,23	1,82
Розрахункова ширина тріщини під навантаженням, $a_{cr} \leq \Delta_{cr} = 0,02$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
Перевірка на розкриття повздовжніх тріщин σ_{bx}	0,369	0,78

Результати

Провівши зрівняльний розрахунок та отримавши результати, можна зробити декілька висновків:

1. Згідно рекомендацій норм проектування з розрахунку товщини плити рекомендовано брати у межах від 1/12 до 1/15 від довжини розрахункового прогону залізобетонної прогонової будови зі звичайного залізобетону. У нашому

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

випадку довжина розрахункового прогону дорівнює 12,8 м, тобто рекомендована товщина плити повинна бути у межах від 8,5 см до 10 см. Однак в інших джерелах (БНіП) розрахункова товщина плити рекомендована братися не менше 15 см з умови розміщення арматури та забезпечення захисного шару. В зв'язку з цим для обох варіантів нами прийнята розрахункова товщина плити рівна 15 см.

2. Враховуючи, що композитна арматура, у основі якої полягає плетені нитки (волокна) вуглецю, має значно більший модуль пружності та розрахунковий опір, можна зробити висновок, що саме за рахунок цього ми значно можемо скоротити площу композитної арматури на основі вуглецевих волокон. Це підтверджує розрахунок на міцність, витривалість та тріщиностійкість. Якщо уточнена площа металевої арматури необхідна в плиті у кількості $12,17 \text{ см}^2$ (12 стержнів діаметром 1,2 см), то для композитної арматури необхідна уточнена площа складає $5,23 \text{ см}^2$.

3. При проведенні зрівняльного розрахунку виявилось, що висота стиснутої зони бетону при розрахунках на міцність для композитної арматури з вуглецевого волокна більша, ніж при використанні звичайної гладкої арматури А-I у плиті баластного корита. Таким чином можна зробити висновок, що при використанні тієї ж композитної арматури є можливість брати клас бетону менший, ніж заданий.

4. Несуча здатність, і, як наслідок, умова міцності при розрахунку на міцність за згинальним моментом плити баластного корита у арматурі зі звичайної сталі марки А-I та у композитної арматури з вуглецевого волокна майже однакова: для звичайної арматури – 3351,42 кНсм, а для композитної арматури з вуглецевого волокна небагато більше – 3391,67 кНсм при дії зовнішнього згинального моменту, рівного 2974,2 кНсм. Як бачимо, різниця їх складає 1,18 %.

5. При розрахунку плити баластного корита на витривалість виявилось, що висота стисненої зони композитної арматури з вуглецевого волокна в цьому випадку відмінна від висоти стисненої зони бетону для звичайної арматури марки А-I, при чому відмінність для композитної арматури складає у 2 рази менше. Через це перевірка при розрахунку на витривалість для композитної арматури не виконується, і, таким

чином, необхідно збільшувати висоту стисненої зони бетону.

6. Приведений момент інерції для плити, армованої композитної арматурою із використанням вуглецевого волокна, в 5 разів менший, ніж для звичайної арматури марки А-I. Виходячи з цього, так як момент інерції підставляється у знаменник при розрахунку плити баластного корита та перевірки її на витривалість, момент інерції для композитної арматури потрібно збільшувати висоту стиснутої зони бетону, як було сказано у пункті 5. Це можливо зробити, знизивши клас бетону до класу В 20.

Провівши розрахунок можна уточнити розрахунки, які наведені у табл. 4. На основі перелічених вище висновків вносимо корективи до розрахунку: клас бетону зменшуємо до В20, перераховуємо робочу висоту, площу робочої арматури, коефіцієнти A_0 , α , r_0 та y_0 , висоту стиснутої зони бетону при розрахунках на міцність та витривалість, приведений момент інерції перерізу плити. Висоту стиснутої зони бетону при розрахунку на витривалість назначаємо $x' = 4,16$ см, так як отримали її розрахунком зворотнім ходом. Для зручності цю частину було оформлено у табличному вигляді (див. табл. 4).

Наукова новизна та практична значимість

Даний розрахунок не має інших аналогів в Україні, та його результати підтверджують економічну доцільність використання композитної арматури. Економічна ефективність таких прогонових будов наведена у табл. 5.

Таблиця 5

Зрівняння вартості прогонових будов

Вартість прогонової будови, грн.	Звичайна арматура класів А-I та А-III з бетоном класу В 25	Композитна арматура з бетоном класу В 20
	44740 грн.	33696 грн.

Висновки

На основі вище перелічених розрахунків можна зробити такі висновки:

1. Застосування вуглецевого волокна зменшує інтенсивність постійного навантаження від власної ваги на 11 %; дає можливість зменшу-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

вати товщину захисного шару бетону (арматура не кородує); забезпечує довговічність прогоно-

вої будови за рахунок відсутності корозії арматури; застосовувати бетони нижчого класу.

Таблиця 4

Уточнені результати розрахунку

№	Параметр	Арматура (метал)	Композитна арматура	Композитна арматура (уточнене)
1.	Клас бетону	B 25	B 25	B 20
2.	Робоча висота h_0 , см	12,62	8,46	12,56
3.	Робоча висота (уточнена) h_0	13,38	8,58	12,58
4.	Площа робочої арматури A_s	12,17	5,23	3,1
5.	Кількість стержнів n_s	12	12	10
6.	Площа робочої арматури (уточнена)	13,57	6,03	5,03
7.	Висота стиснутої зони бетону x , см	2,09	3,95	4,08
8.	Умова: $(x / h_0) \leq \varepsilon_y$	$0,156 \leq 0,66$	$0,46 \leq 0,482$	$0,43 \leq 0,5$
9.	Умова міцності бетону	3351,42	3391,67	3230,14
10.	Перевірка напруження у стисненому бетоні σ_b	$0,61 \leq 1,05$	$1,645 \leq 1,05$	$0,845 \leq 0,85$
11.	Перевірка напруження у розтягнутій арматурі σ_s	$10,07 \leq 14,08$	$29,15 \leq 76,7$	$33,5 \leq 76,7$

2. Арматура з вуглецевого волокна може зберігатись та перевозитись у бухтах на відміну від сталевих.

3. Відгини стержнів можна виконувати по дузі, що ніяким чином не впливає на несучу здатність.

4. З точки зору заводського виготовлення та сировинної бази на Україні та зокрема у Дніпропетровській області є можливим виготовлення виробів з використанням вуглецевого волокна та інших композитних матеріалів, тому такий параметр, як вартість не буде занадто принциповим.

5. Економічне зрівняння у табл. 5 показало, що при використанні різних класів бетону та різних типів арматури дешевшим є варіант з використанням композитної полімерної арматури на основі вуглецевого волокна, що є підтвердженням її ефективності.

6. Можна облегшити прогонову будову за рахунок утворення отворів (пустот) як в поперечному так і в поздовжньому напрямі.

7. У плиті можна застосовувати вуглецеве волокно малого діаметру (4 мм), що дає змогу збільшити висоту стисненої зони.

Всі ці позитивні фактори вказують на те, що з часом вуглецеве волокно може знайти своє належне місце в мостобудуванні і дозволити проектувати прогонові будови з терміном експлуатації до 200 років.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борщов, В. И. Расчет железобетонного пролетного строения с каркасно-сварной арматурой под железную дорогу [Текст] / В. И. Борщов. – Днепропетровск : ДИИТ, 1999. – 56 с.
2. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – Чинні від 2007-02-01. – Київ : Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
3. Сімамура, С. Углеродные волокна [Текст] : пер. з японс. / С. Сімамура – Москва : Мир, 1987.
4. Будницький, Г. А. Углеродные волокнистые материалы, применяемые в качестве армирующих наполнителей [Текст] / Г. А. Будницький // Журн. ВХО им. Д. И. Менделеева. 1989. – Т. 34. – № 5. – С. 438-446.
5. Хімічний портал ChemPort.Ru : [Електронний ресурс] – Режим доступу : http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article_3917.html

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

6. Вармастрой. Ремонт и усиления конструкций [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.varmastroy.ru/articles/item/37/>
7. Полимерпортал России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.polimerportal.ru/index.php/2008/11/po-luchenie-uglerodnyh-volokon-i-ix-svoystva/>

В. Г. ВЫСКРЕБЕНЦЕВ^{1*}, К. И. СОЛДАТОВ^{2*}

^{1*} Отраслевая научно-исследовательская лаборатория искусственных сооружений, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (0562) 33 58 12

^{2*} Каф. «Мосты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (096) 527 26 01, эл. почта kim-kim@i.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Цель. В данной работе представлено использование углеродного волокна в виде композитной арматуры в качестве стержней арматуры для армирования железобетонного пролетного строения длиной 13,5 м в сравнении с пролетным строением аналогичной длины, но с использованием обычной арматуры. **Методика.** Расчет ведется по методике, описанной в методических указаниях при проектировании и расчете железобетонного пролетного строения с каркасно-сварной арматурой. **Результаты.** На основе приведенного исследования была определена эффективность использования композитной арматуры в качестве рабочей для армирования ею пролетного строения. **Научная новизна.** Доказана возможность использования композитной арматуры в качестве элемента, который работает на растяжение в пролетном строении. **Практическая значимость.** Установка арматуры такого типа позволит снизить стоимость пролетного строения и увеличить ее период эксплуатации.

Ключевые слова: углеродное волокно; каркасно-сварная арматура; композитная арматура

V. G. VYSKREBENTSEV^{1*}, K. I. SOLDATOV^{2*}

^{1*} Laboratory of Artificial Structures, The Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.+38 (0562) 33 58 12

^{2*} Dept. of Bridges, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 527 26 01, e-mail kim-kim@i.ua

RESEARCH OF EFFICIENCY OF USING CARBON FIBER IN ARMORED CONCRETE SPANS OF RAILWAY BRIDGES

Purpose. This work presents using carbon fiber as composite rebar by way of rods of fittings for reinforcement armored concrete span 13,5 meter length compared to same-length span with usual fixture. **Methodology.** The calculation is carried out as described in the methodological guidelines for the design and calculation of concrete span with frame-welded fittings. **Findings.** On the basis of the above study was to determine how the use of composite reinforcement as working for the reinforcement of its span. **Originality.** The possibility of using composite rebar as an element that works in tension in the span was proved. **Practical value.** Install valves of this type will reduce the cost of the span and increase its operating period.

Keywords: carbon fiber; frame-welded fittings; composite rebar

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

Надійшла до редколегії 20.06.2014.

Прийнята до друку 02.07.2014.