

Получена: 15.09.2017 г.

Приета: 27.11.2017 г.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ ЗА ПРИЛАГАНЕ НА ТЕКСТИЛНО-АРМИРАН БЕТОН ЗА УСИЛВАНЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ МОСТОВИ ГРЕДИ

С. Бошнаков¹

Ключови думи: текстилно-армиран бетон, усилване, мостове, стоманобетон

РЕЗЮМЕ

Текстилно – армираният бетон е иновативен материал, който намира все по-голямо приложение в строителната индустрия, както в производството на отделни строителни елементи, изпълнението на конструкции, така и в усилването на стоманобетонни конструкции. Това дава доста възможности за прилагане на иновативния материал за възстановяване и усилване на конструктивни елементи.

В изследването са разгледани стоманобетонни греди, подложени на различен брой цикли на натоварване, типични за мостовите конструкции. В експеримента са изследвани елементите след различен брой цикли на натоварване, като е направена съпоставка на изследваните величини.

1. Въведение

От около 20 години се изследва и разработва иновативен материал наречен текстилно-армиран бетон, който се прилага за усилване на стоманобетонни елементи, както и за изработването на строителни конструкции. Текстилно армираният бетон е високоякостен иновативен материал, който се характеризира с високи експлоатационни показатели. Този материал намира все по-голямо приложение в усилването на стоманобетонни конструкции, което разкрива и неговата възможност за прилагането му в усилването на стоманобетонни елементи от мостовото строителство.

¹ Симеон Бошнаков, д-р инж., e-mail: sinbosh07@gmail.com

Затова в настоящия експеримент е направено изследване на дълготрайността и експлоатационната годност при усилването с иновативен високо технологичен материал – текстилбетон за усилване на стоманобетонни елементи от горното строене на мостови конструкции. За целта са направени изследвания на адхезията между стар бетон и текстилно-армиран бетон (новоположеният усилващ пласт) при различен брой цикли на натоварване. За изясняване на промените, възникващи в поведението на изследваните образци при различния брой цикли на натоварване, част от изследваните образци са натоварени до разрушаване, а при някои елементи е проведено наблюдение и на пукнатини.

2. Свойства на текстилно-армираният бетон

С развитието на технологиите и високоякостните материали се развиват и нови възможности за усилване на строителните конструкции. Такъв материал е текстилно-армираният бетон, който се характеризира с изключително високи якостни характеристики. Текстилно-армираният бетон се характеризира с изключително малка дебелина на усилващия слой и изключително голяма ефективност.

По структура и характер той прилича на стоманобетона, но е доста по-тънък, защото за армировка се използват мрежи от нишки, които нямат нужда от толкова голямо бетонно покритие, от което се нуждае обикновената армировъчна стомана. Съответно елементите, които се изпълняват от този материал, имат доста по-малка дебелина, затова усилващите слоеве, които се изпълняват от този материал, имат дебелина между 10 и 30 mm и в някои изключителни случаи дебелина от 50 mm.

Армировъчните мрежи, които се използват за армиране на текстилбетона, имат дебелина от 0,6 mm. до 2,5 mm, чиито диаметри са много по-малки в сравнение с обикновената армировъчна стомана. Текстилните армировъчни мрежи могат да бъдат изпълнени от въглеродни нишки, стъклени нишки и други високоякостни материали.

Таблица 1. Сравнение на физическите характеристики на армировъчните материали [8]

Параметър	Стомана	AR-стъкло	Базалтови нишки	Въглеродни нишки
Плътност [g/cm ³]	7,9	2,7	2,6 – 2,8	1,8
Е-модул	210	76	90 – 110	240 – 600
Опънна якост [GPa]	0,3 – 0,6	2,0	4,8	3,0 – 5,0
Деформация на разрушаване [%]	18 – 26	2,6	3,15	1,0 – 1,5
Корозионна устойчивост	–	+	–	++

Поради употребата на високоякостни нишки, този материал е много подходящ за усилване на стоманобетонни елементи и конструкции от обикновен и напрегнат стоманобетон. За разлика от другите усилващи материали с високоякостни нишки този материал има по-добро сцепление със стоманобетонния елемент вследствие на факта, че текстилните армировъчни мрежи са разположени в тънък слой от фин бетон, което подо-

брява работата с обикновения бетон. Той се характеризира с висока коравина, якост и експлоатационна годност.

Освен за прилагане на текстилбетона, като материал за възстановяване и усилване на стоманобетонни конструкции от високото строителство се провеждат изследвания за неговото приложение в мостовото строителство [6].

До момента в мостовото строителство е изследвана концепцията той да бъде използван като доливка върху стоманобетонната пътна плоча, поради добрата алкална устойчивост на въглеродната и стъклената мрежа, подробно описани в [6]. Също така и от добрите показатели на носимоспособност на циклични натоварвания, както и на статични въздействия. Тази концепция за приложение за усилване в мостовото строителство е разработена в [7], като за прилагането на текстилбетона, като доливка се използва специално разработена с подобрена твърдост текстилно-армирана бетонна смес. Връзката между стария бетон и усилващия слой се постига посредством обработването на съществуващата повърхност по разработен метод на база на принципа на водоструенето под високо налягане, с което се осигурява необходимата грапавина на основата (съществуващата бетонна повърхност).

Все още не са провеждани експерименти за усилване на стоманобетонни елементи с текстилбетон за мостови конструкции, при които да се отчете работата на материала с течение на времето. В един такъв експеримент би могло да се уточни дълготрайността и надеждността на този вид усилване в периода на експлоатация. Това разкрива доста възможности за изследване на различни начини за усилване и разкрива нови възможности за приложението на материала в усилването на мостови конструкции.

3. Цели и задачи на експеримента

Целта на експерименталното изследване е да се определи и анализира влиянието на текстилно-армирания бетон, повърхностно апликиран към бетонното сечение в неговата опънна зона на стоманобетонни греди, които не са предварително подлагани на циклично натоварване. Освен това е необходимо да се установи разликата в поведението на усилените греди вследствие на различна експлоатация, да се анализира приложимостта на материала за усилване на стоманобетонни мостове, както и да се установи дали има промяна в адхезията между усилваща система и обикновен стоманобетон при интензивно циклично натоварване, както и да се установят промените в деформативността и в носимоспособността на елементите.

В експеримента е проведено циклично натоварване на усилените стоманобетонни елементи с текстилно-армиран бетон на различни степени. След всяка група с различен брой цикли на натоварване се предвижда изпитване на адхезията между двата материала посредством pull-off test [3] и отделяне на един образец за натоварване на разрушаване, освен това преди и след цикличното натоварване на всеки образец е провеждано натоварване до експлоатационен товар, при който са наблюдавани възникналите деформации вследствие на продължителното циклично натоварване.

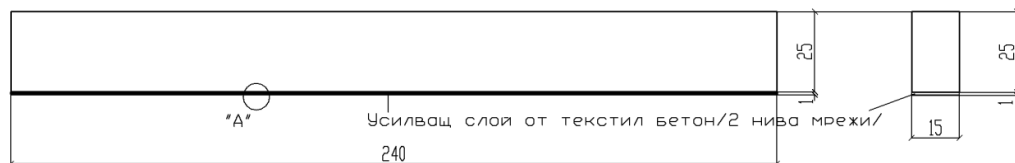
3.1. Експериментални образци

За целите на експеримента са изработени 12 опитни образца с размери 25/15/240 cm [3]. Образците са изработени от бетон C25/30 и армировъчна стомана B500B, подробно дадени в [3]. След производството на стоманобетонните елементи в завод те са пре-

местени в лабораторията и са усилены на 55-ия ден. Експерименталната работа стартира 60 дни след усиляването им с текстилно-армиран бетон.

Дебелината на усиляващия слой е 1 cm, като се състои от две армировъчни мрежи разположени на разстояние 3 mm и покрити с бетонно покритие с дебелина 3(4) mm. При проектирането на изпитвателните образци са следвани указанията на производителите и характеристиките на материала, дадени в [5].

За целите на експерименталното изследване е разработен един вариант на усиляване, както е описано в [3] и е показано на фиг. 1. Ширината на усиляващите слоеве от въглеродни мрежи е 15 cm, колкото е и ширината на стоманобетонните греди, площта на въглеродната армировъчна мрежа е $A_{tex} = 37,39 \text{ mm}^2$, а полезната височина на усиленото стоманобетонно сечение е $d_{tex} = 255 \text{ mm}$



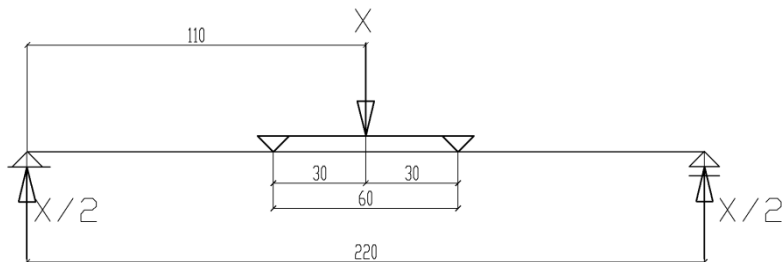
Фиг. 1. Схема на усиляване на стоманобетонните греди с текстилбетон [3]

За усиляването на стоманобетонните образци е избран ръчният метод за полагане на усиляващата система. При този метод първо се почиства и подготвя основата на усилявания стоманобетонен елемент съгласно технологията и изискванията, описани в [5], [10] и технологичната последователност, дадена в [11].

3.2. Начини на натоварване

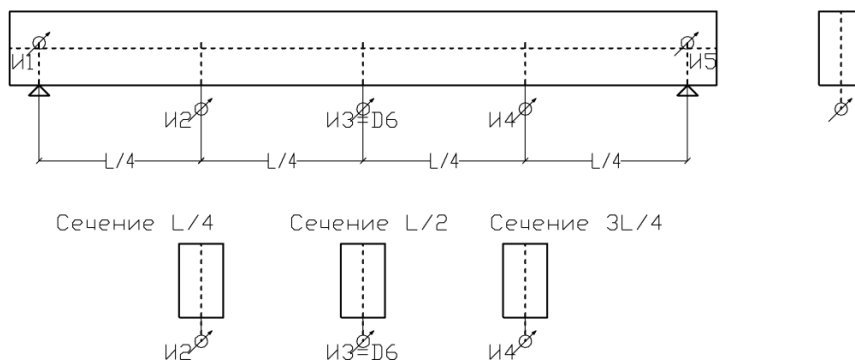
Експерименталните образци са разделени в 4 групи по три образца в група, като всяка група е с различна продължителност на цикличното натоварване. Така образците от I група са без циклично натоварване, образците от II група са подложени на 150 000 цикъла на натоварване, образците от III група на 600 000 цикъла на натоварване, а образците от IV група на 1 200 000 цикъла.

Образците от първа група са подлагани само на изпитвания за адхезията между двата материала, а образците от втора, трета и четвърта група са подлагани на статично, динамично и натоварване до разрушаване, с цел доуточняване на промените в адхезията между двата материала вследствие на различната продължителност на цикличното натоварване. При някои от елементите от IV група е извършено наблюдаване на пукнатини.



Фиг. 2. Схема на статично и циклично натоварване [3]

Статичното и цикличното натоварване на стоманобетонните образци се извършва чрез хидравлична UPZ преса, като прилаганата сила от хидравличния цилиндър се превърля на изпитвания образец посредством стоманена траверса (фиг. 2) с дължина 60 cm, при което силата се разделя на две равни части и симетрично върху образца. Изпитваните образци са подпрени на еластомерни лагери по време на цикличното и статичното натоварване в етап II на експеримента [3]. В етап IV при натоварване до разрушаване са използвани линейни точкови опори, при което при опорите са разположени датчици за отчитане на деформациите, възникващи в елемента съгласно фиг. 2.



Фиг. 3. Схема на разположение на провисомерите при натоварване до разрушаване [3]

Цикличното натоварване е така проектирано, че да се симулира често повтаряща се товарна комбинация съгласно [4] за мостови греди. Цикличното натоварване се извършва с честота от 4,5 Hz и концентрирана сила от 27,5 kN и амплитуда от 3 kN, чрез което се получава натоварване от 25 до 31 kN.

4. Резултати от експеримента – анализ и оценка на резултатите

4.1. Анализ и оценка на резултати от разрушаване на стоманобетонни елементи след различен брой цикли на натоварване

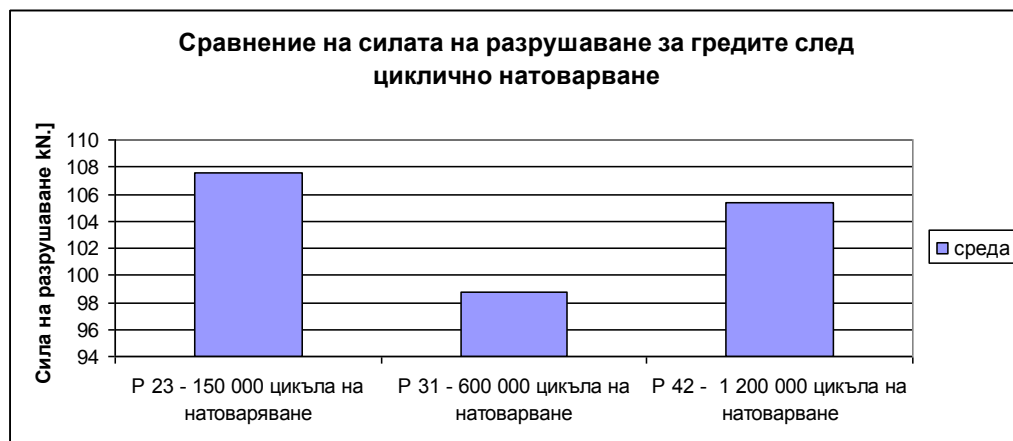
В етап 4 на експеримента е проведено натоварване до разрушаване по един образец от втора, трета и четвърта група, които преди това са били подложени на циклично натоварване, съответстващо на групата им. При анализа на резултатите е направена съпоставка между показателите и критериите, дефинирани в експеримента в [3] между образците с различна продължителност на циклично натоварване.

За изходни са приети получените стойности от разрушението на елемента, натоварен на 150 000 цикъла като се отчита незначително малкият брой цикли на натоварване спрямо останалите образци от другите групи, подлагани на по-голям брой цикли на натоварване.

В този етап на експеримента са натоварени до разрушаване три стоманобетонни образца, които са били съответно подложени на циклично натоварване, което при различните образци се различава само по продължителност, съответно P23, подложен на 150 000 цикъла на натоварване, P31, подложен на 600 000 цикъла на натоварване и образец P42, подложен на 1200 000 цикъла на натоварване, като за него е проведено статично натоварване до експлоатационен товар и е отчетено образуването на пукнатини.

Таблица 2. Максимални провисвания при натоварване до разрушаване [3]

Провисване	1/l	mm	Разлика	%
P23 – 150 000 цикъла на натоварване	1/170	12,92	0	100
P31 – 600 000 цикъла на натоварване	1/137	12,92	3,13	+24,23
P42 – 1200 000 цикъла на натоварване	1/144	12,92	2,32	+17,96



Фиг. 4. Максималната сила на разрушаване при различен брой цикли на натоварване [3]

В настоящия анализ за базисен е приет елемент P23, натоварен на 150 000 цикъла, тъй като е с най-малък брой цикли на натоварване, а във всяка мостова конструкция е подложена на интензивно циклично натоварване.

При всички греди се забелязва един механизъм на разрушение, който настъпва от опънатата зона и се състои в нарушаване на сцеплението между усилваща система и стоманобетонен елемент вследствие на огъването. Този тип на разрушение би могъл лесно да се прогнозира чрез по-нататъшните тестове за изпитване на адхезията между двата материала.

При греда P23 е отчетена най-голямата сила на разрушаване, а при P31 е най-малката сила на разрушаване с разлика от 8,85%, докато при греда P42 разликата е само 2,32%.

На база на направените анализи гр. P32 развива най-големи деформации в опънатата зона, съответно показва най-малка носимоспособност и показва сравнително ниски деформации в опънатата зона за разлика от гр. P23 и гр. P42.

Също така е интересно да се направи анализ и на стойностите на съответните коефициенти на разрушаване и на сигурност при елементи с различно циклично натоварване:

k_s – коефициент на сигурност;

k_{rup} – коефициент на разрушаване.

Таблица 3. Сравнение на коефициента на сигурност и коефициента на разрушаване [3]

	P23 – 150 000 цикъла на натоварване	P31 – 600 000 цикъла на натоварване	P42 – 1200 000 цикъла на натоварване
k_s	3,10	2,845	3,03
k_{rup}	1,689	1,546	1,648

От горната таблица се вижда, че въпреки намалената носимоспособност на елементите вследствие на цикличното натоварване все още има значителна носимоспособност спрямо общоприетите очаквания за стоманобетонни конструкции и значителна степен на сигурност. Това показва, че относно носимоспособността при този брой изпитани образци може да се направи заключението, че материалът би могъл да се използва за усиление на елементи на мостове, но е необходимо изпитването на по-голям брой образци с цел постигане на по-стабилни резултати.

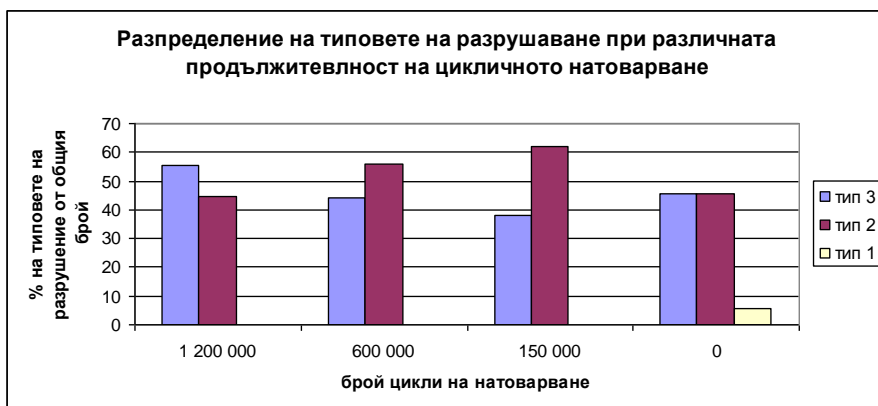
4.2. Резултати от тестване на адхезията на стоманобетонни образци, усилен с текстилно-армиран бетон след различен брой цикли на натоварване

При тестването на адхезията е използван стандартният pull-off тест, при който се прорязва кръгъл пръстеновиден отвор от усилящия слой, навлизащ до бетона на минимум 5 mm, след което върху вътрешността на пръстена на усилящия слой бива залепена стоманена плочка, която след това бива издърпвана до разрушаване и се отчита силата, при която то настъпва. На база на това, къде настъпва разрушението, се определя дали то е адхезионно или кохезионно и се отчита силата на разрушаване.

В план-програмата на експеримента в [3] са дефинирани три типа на разрушаване:

- 1 тип – разрушаване в усилящата система, което е кохезионно. При него се измерва кохезията на усилящия материал.
- 2 тип – разрушението настъпва във фугата между двата материала. В конкретния случай между стоманобетона и усилящия слой от текстилно-армиран бетон. При този тип на разрушаване също се отчита адхезията между двата материала.
- 3 тип – разрушението настъпва изцяло в бетонното покритие на усиления стоманобетонен елемент. В този случай се измерва адхезията между двата материала.

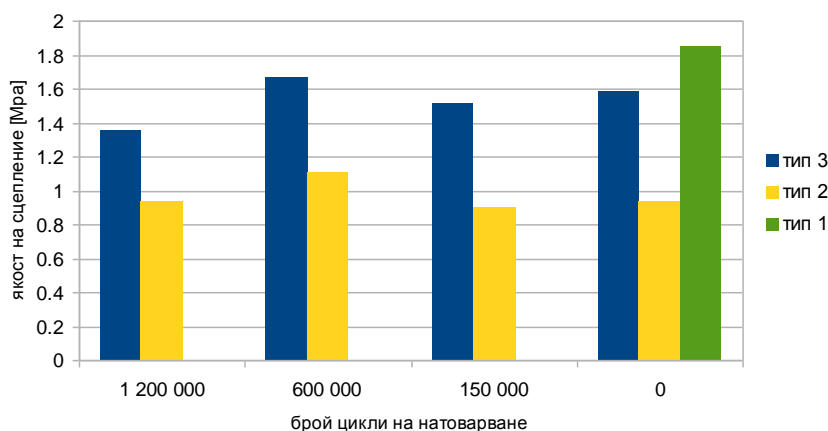
При различните степени на циклично натоварване се забелязва преобладаване на различен брой типове на разрушаване, както и малки вариации в силата на сцепление между двата материала.



Фиг. 5. Разпределение на типовете на разрушаване при различен брой цикли на натоварване [3]

От фиг. 5 се вижда, че единствено при образците без циклично натоварване има тип 1 на разрушение, което показва кохезията на усилващия материал. При него е отчетена стойност, съпадаща от други проведени експерименти [9], при които е изследвана кохезията на текстилно-армирания бетон. Това показва, че използвания текстилно-армиран бетон има сравнително добри качества. При изпитването на елементи от останалите групи такъв тип на разрушаване не се среща, но от графиката се вижда тенденция към намаляване на тип 2 на разрушаване с увеличаване на броя на циклите на натоварване. Докато при 1 200 000 цикъла на натоварване преобладаващ се оказва тип 3 на разрушаване изцяло в бетонното покритие на усилвания стоманобетонен елемент. Оттук може да се направи изводът, че с увеличаване на броя на циклите на натоварване се увеличават и типът на адхезионните разрушения в бетонното покритие.

Различните типове на разрушение при различна степен на циклично натоварване



Фиг. 6. Разпределение на напреженията на сцепление между бетон и усилваща система при различен брой цикли на натоварване и различен тип на разрушение [3]

От фиг. 6 се вижда, че най-висока якост се получава при тип 1 на разрушаване, докато най-ниска – при тип 2 на разрушаване, разрушаване във фугата между усилваща система и стоманобетон.

За тип 2 на разрушаване за 150 000 цикъла на натоварване и без циклично натоварване се забелязват приблизително еднакви стойности, както и при тип 3.

Единствено якостта, която се наблюдава при 600 000 цикъла, е незначително по-висока от базисно приетата с около 5% за базисно приета за тип 3 и с 17,4% за тип 2.

При 1 200 000 цикъла се наблюдава спад с около 14,5% при тип 3 и не се наблюдава промяна при тип 2 на разрушаване.

От изложените резултати в [3] се забелязва спад и при 150 000 цикъла на натоварване спрямо първоначалните стойности, като отчетеният спад е около 4% при тип 3 и при тип 2.

Това показва, че цикличното натоварване оказва известно намаляване на адхезията между двата материала при тип 3, като също така и при 4 група този тип на разрушаване е преобладаващ за разлика от разпределението на разрушенията при останалите елементи. Това би могло да се счита за възникване на умора на сцеплението между двата материала, които вследствие на образуваните пукнатини под действие на увеличаващото се циклично натоварване, навлиза първоначално в усилващия слой, а в следствие се разрушава връзката в самия усилван елемент, изпълнен от стоманобетон, като повечето разрушения са в бетонното покритие. Това показва, че усилващата система има значително по-добри качества на адхезията от бетона под действие на цикличното натоварване.

5. Изводи

От направените експерименти в [3] се наблюдават някои промени в поведението на усилените стоманобетонни елементи с текстилно-армиран бетон с увеличаване на продължителността на цикличното натоварване. Това се забелязва при изпитаните образци на разрушаване, при които с увеличаване на продължителността на цикличното натоварване се забелязва тенденция за увеличаване на деформациите и намаляване на носимоспособността. Въпреки малките промени, които са в обсега на статистическото разсейване на резултатите, признаците за промяна в характера на работа на усилените елементи се потвърждават и от проведените тестове на адхезия. При тях е налице промяна на типа на разрушаване вследствие на покачващото се циклично натоварване, като с увеличаване на цикличното натоварване е налице и промяна в якостта на адхезията с тенденция към нейното намаляване.

Не трябва да се пропуска и фактът, отбелязан в [3], за увеличаване брой на пукнатините в усилващата система и в усилвания елемент вследствие на цикличното натоварване, въпреки че не е налице увеличаване на ширината на пукнатините от цикличното натоварване.

Отчетените параметри в измерваните параметри вследствие на цикличното натоварване са доста малки по стойност и освен това обобщеният коефициент на сигурност показва доста добри стойности, което дава основание за приемане на текстилно-армиран бетон, като надежден материал за усилване на мостови греди в бъдеще. Въпреки това е необходимо да се направят по-мощни изследвания с по-голям брой цикли на натоварване за уточняване на работата на материал при неговата експлоатация при циклично натоварване, което е типично за мостовите конструкции.

Благодарности

Най-сърдечни благодарности на ЦНИП на УАСГ за осигуреното финансиране за провеждане на експериментите, както и на проф. д-р инж. Костадин Топуров за оказаната подкрепа и дадените ценни указания в организацията и провеждането на експеримента.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бошанков, С., Топуров, К.* Различни начини за усилване на стоманобетонни елементи на пътни мостове. Четвърти симпозиум по транспортни съоръжения. УАСГ – София. Приложение към том XLVII на годишника. София, 2015 г.
2. *Бошнаков, С.* Оценка на влиянието на цикличното въздействие върху сцеплението на греди усилени с текстил-бетон. // Годишник на Университет по архитектура, строителство и геодезия –София, 2016 г., том 49, брой 4.
3. *Бошнаков, С.* Възстановяване и усилване на стоманобетонни елементи и конструкции на мостове. Дисертация. Университет по архитектура, строителство и геодезия. София, 2017 г.
4. БДС EN 1992-1. Еврокод 1: Въздействия върху строителни конструкции. Част 2: Подвижни натоварвания от трафик върху мостове. БИС, София, 2006г.
5. DIBt, Zulassungsnummer Z-31.10-182. Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrte Beton). Juni 2014
6. *Feix, J., Hansl, M.* Pilotanwendung von Textilbeton für Verstärkungen im Brückenbau. 25. Dresdner Brückensymposium, Technische Universität Dresden, 2015.
7. *Hansl, M.* Textilbewehrte Betone zur Instandsetzung und Verstärkung von Fahrbahnplatten aus Stahlbeton. Dissertation Universität Innsbruck, 2014.
8. *Kirsten, M., Freudenberg, Chr., Cherif, Ch.* Carbonfasern der Werkstoff des 21. Jahrhunderts. Textile Ausgangsbasis für filigrane hochtragende Betonbauteile. Beton und Stahlbetonbau (2015). Supplement “Verstärken mit Textilbeton”, Januar 2015.
9. *Ortlepp, R.* Untersuchungen zur Verbundverankerungen textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschichten für Betonbauteilen. TU Dresden, Dissertation, 2007.
10. Richtlinie für Eignungsnachweis zum Verstärken von Betonbauteilen mit Textilbeton für Bausätze mit allgemeiner bauaussichtlicher Zulassung, Fassung, Mai 2015.
11. *Walther, T., Weiland, S.* Baustellverfahren für Verstärkungen mit Textilbeton. Beton und Stahlbetonbau Spezial 110 (2015). Supplement “Verstärken mit Textilbeton”.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE USE OF TEXTILE REINFORCED MORTAR FOR STRENGTHENING CONCRETE BEAMS OF BRIDGES

S. Boshnakov¹

Keywords: textile reinforced mortar, strengthening, bridges, concrete

ABSTRACT

Textile reinforced mortar is an innovative material, which is becoming increasingly used in the construction industry, both in the production of different elements and implementation of structures, and as a strengthening material of concrete structures. This gives a lot of opportunities for using this innovative material for retrofit and strengthening of structural elements.

The study examines some beams that have been loaded under different number of load cycles typical for the bridge structures. In the experiment, the elements have been investigated after different number of load cycles and a comparison of the studied parameters has been made.

¹ Simeon Boshnakov, Dr. Eng., e-mail: simbosh07@gmail.com