DCB 2025
III Младежка научна конференция с международно участие
„Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 29 октомври 2025 г., София
III Youth Scientific Conference with international participation
„Design and Construction of Buildings and Facilities“, October 29, 2025, Sofia, Bulgaria
ISSN 2738-7887 (online); ISSN 2738-7879 (CD-ROM)

УСИЛВАНЕ НА СТОМАНОБЕТОННА МОСТОВА ГРЕДА С АРМИРАНИ С ФИБРИ ВИСОКОЯКОСТНИ БЕТОНИ – РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

Виктория Стоилова[1], Емад Абдулахад[2]

STRENGTHENING OF A REINFORCED CONCRETE BRIDGE BEAM WITH HIGH-PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE – EXPERIMENTAL RESULTS

Viktoria Stoilova[1], Emad Abdulahad[2]

Abstract:
Nowadays, the number of vehicles on the transportation network has reached such high levels that existing road bridges face the danger of overloading due to increased traffic. This combined with the inevitable structural deterioration over time leads to the necessity of finding effective ways to increase bridge structures' bearing capacity. High-performance fiber reinforced concrete is a contemporary construction material which presents an interesting option for strengthening reinforced concrete structural members. The objective of the current paper is to explore the effect of this type of strengthening on the bearing capacity and serviceability of reinforced concrete bridge beams. An experimental study of a reinforced concrete beam strengthened with high-performance fiber reinforced concrete layers in the compressive and the tensile zone is conducted in order to analyze the possible application of the material. During the experiment the beam deflections and the relative strains of the concrete and the reinforcement bars are measured. The results of the study show a considerable increase in the beam bearing capacity and decrease of the deflections and the relative strains. Finally, it is observed that the effect of the strengthening layer in the tensile zone is not that significant. In conclusion, the findings in this paper confirm that strengthening with high-performance fiber reinforced concrete is a reliable method for improving the structural reliability of bridge beams.

Keywords:
Experimental study, High-performance Fiber Reinforced Concrete, Reinforced Concrete Bridges, Strengthening

[1] Виктория Стоилова, инж., докторант, кат. „Масивни конструкции“, Строителен факултет, Университет по архитектура, строителство и геодезия, гр. София 1164, бул. Христо Смирненски 1, v.evg.stoilova@abv.bg
Viktoria Stoilova, eng., PhD student, Department of Reinforced Concrete Structures, Faculty of Structural Engineering, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1 Hristo Smirnenski Blvd. 1164 Sofia, Bulgaria, v.evg.stoilova@abv.bg
[2] Емад Абдулахад, доц. д-р инж., кат. „Масивни конструкции“, Строителен факултет, Университет по архитектура, строителство и геодезия, гр. София 1164, бул. Христо Смирненски 1, georgos_fce@uacg.bg
Emad Abdulahad, assoc. prof. eng, PhD, Department of Reinforced Concrete Structures, Faculty of Structural Engineering, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1 Hristo Smirnenski Blvd. 1164 Sofia, Bulgaria, georgos_fce@uacg.bg

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Мостовете са конструкции, които би трябвало да се експлоатират за дълъг период от време. В България е в сила нормативната система Еврокод, според която експлоатационният срок на едно мостово съоръжение е 100 години [1]. За този период обаче настъпват редица промени, вследствие на които е възможно мостът да престане да изпълнява нормално функциите си и дори да се наруши неговата сигурност.

На първо място, състоянието на стоманобетонните мостове в България се влошава непрекъснато поради неблагоприятната среда, в която се експлоатират, и липсата на поддръжка, доказателство за което са тревожните резултати от редица обследвания на мостове в страната ни [2-6]. След това са налице повреди, получени в резултат на грешки при проектирането и изпълнението, породени от несъвършенства на нормативната база, технологията и развитието на науката в момента на изграждане на съоръжението. Така например значителен дял от стоманобетонните мостове в България са изпълнени преди 1980 година, когато изчислителните процедури са били недоразвити, а изпълнението и вложените материали са били с ниско качество, което е довело до необходимостта от сериозни ремонти на тези съоръжения скоро след построяването им [7]. Друг основен проблем при пътните мостове е постоянно нарастващия пътен трафик. Само за период от 20 години (1990-2020 година) пътният трафик в България е нараснал повече от два пъти [8]. Следователно, има вероятност по-старите мостови съоръжения да не могат да поемат днешния пътен трафик и това да доведе до претоварване и дори аварийни ситуации.

Вследствие на тези и други фактори, все по-често е необходимо конструкцията на мостовете да се усилва, за да може съоръжението да продължи да функционира безпроблемно. В наши дни инженерите разполагат с множество възможни подходи за усилване, но един сравнително нов метод започва да добива популярност през последните години, а именно усилване с армирани с фибри високоякостни циментови разтвори. Това са така наречените high-performance concrete (HPC) и ultra high-performance concrete (UHPC) или както са известни сред българските автори – високоякостни бетони и супер-високоякостни бетони [9, 10]. Обикновено UHPC се характеризират с якост на натиск по-голяма от 150 MPa [11, 12].

HPC се отличават с по-големи якостни и деформационни характеристики, повишена дуктилност и дълготрайност и по-добри експлоатационни качества, постигнати чрез усъвършенстване на структурата на бетона [9, 11]. В състава му влизат по-голямо количество високоякостен цимент, по-малко количество вода (ниско В/Ц отношение), дребен добавъчен материал и минерални добавки, пластификатори за подобряване на консистенцията и армировка във вид на дисперсно разпръснати фибри (стоманени или полимерни) [9, 11-14].

Подобрените характеристики на HPC го правят изключително подходящ избор при усилването на стоманобетонни мостове, тъй като от една страна материалът позволява да се постигне значително увеличаване на носещата способност и коравината на конструкцията при малка промяна в габаритните размери и съответно теглото на елементите [11, 12] и от друга страна – HPC са устойчиви на атмосферни влияния и агресивни агенти [12, 13], на каквито са изложени мостовите конструкции. Ето защо тези материали представляват голям интерес за учените по цял свят през последните няколко десетилетия, за което свидетелстват множеството експериментални изследвания [14-17]. Практическото му приложение също набира все по-голяма популярност, като в много държави има изпълнени проекти за усилване на мостове с HPC [18-20]. В България HPC все още не са толкова разпространени. От 2010 година насам обаче българските автори започват да се интересуват от HPC [9, 10, 12, 21-23], като се разглежда и възможното му прилагане при конструктивно усилване [10, 21, 23].

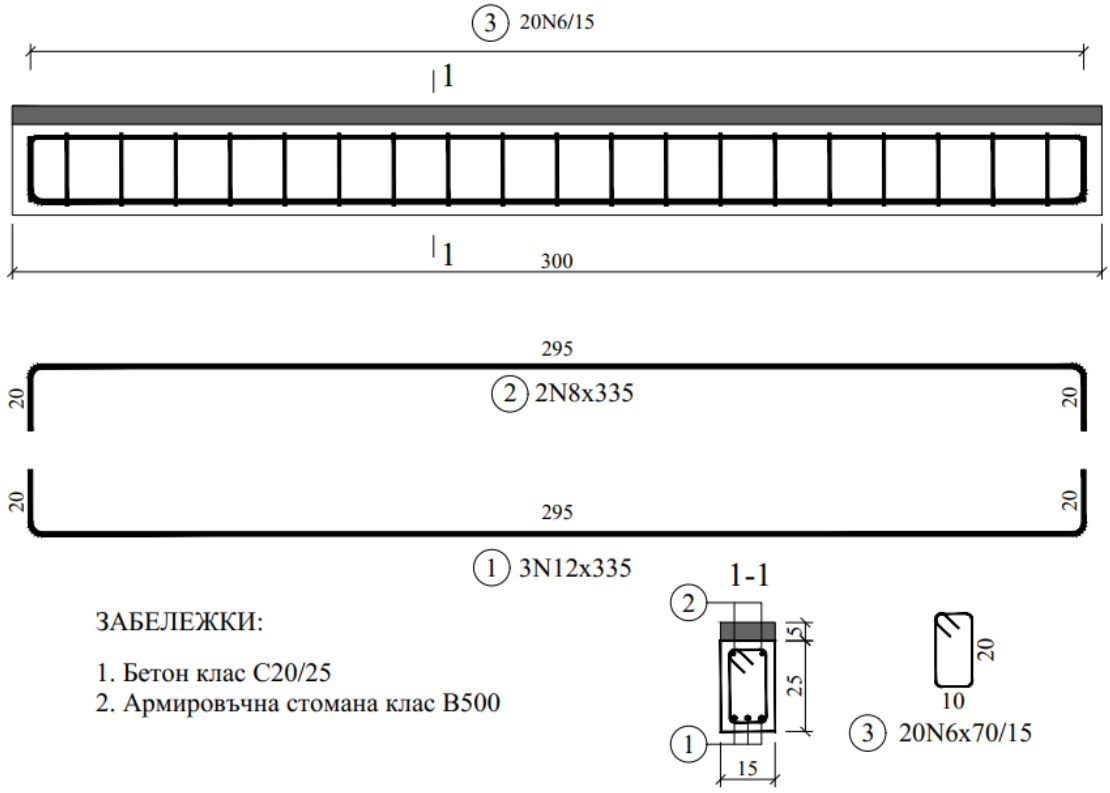
Целта на настоящото експериментално изследване е да покаже ефекта от усилването с HPC върху носещата способност и експлоатационните качества на съществуваща стоманобетонна греда. Резултатите от това проучване биха могли да имат практическо приложение при избора на подходящ и целесъобразен метод за усилване на връхните конструкции на съществуващи стоманобетонни мостове, имайки предвид големия брой мостови съоръжения в България, които се нуждаят от рехабилитация с цел повишаване на носещата способност и подобряване на експлоатационната годност, за да могат да продължат да изпълняват безпроблемно своите функции.

Изпитването е проведено с финансовата подкрепа на Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ (договор Д-158/24).

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАНОВКА И ИЗМЕРВАТЕЛНА АПАРАТУРА

2.1. Експериментална постановка

Изследваният образец е съществуваща греда, изпълнена през 2018 година, която е изпитана, след което е усилена в натисковата зона с високоякостен бетон и е изпитана отново. Резултатите от това изследване са представени в [10]. На фигура 1 са показани размерите и армировката на гредата.



Фигура 1. Размери и армировка на изпитваната греда [10]

В настоящото изследване гредата е усилена в опънната зона с готов армиран с фибри високоякостен разтвор на фирма MAPEI – Planitop HPC [24]. Усилващият слой е с дебелина 5 cm. За да се осъществи надеждна връзката между „стар“ и „нов“ бетон преди изливане на усилващия слой върху повърхността на съществуващата греда е нанесен разтвор за адхезия и са изпълнени химически анкери съгласно изискванията на БДС EN 1992-4 [25]. От усилващия материал са излети пробни тела, които са изпитани съгласно изискванията на БДС EN 12190 [26]. Установена е средна кубова якост на натиск на усилващия разтвор 130,6 MPa, което потвърждава данните, предоставени от фирмата производител [24]. След

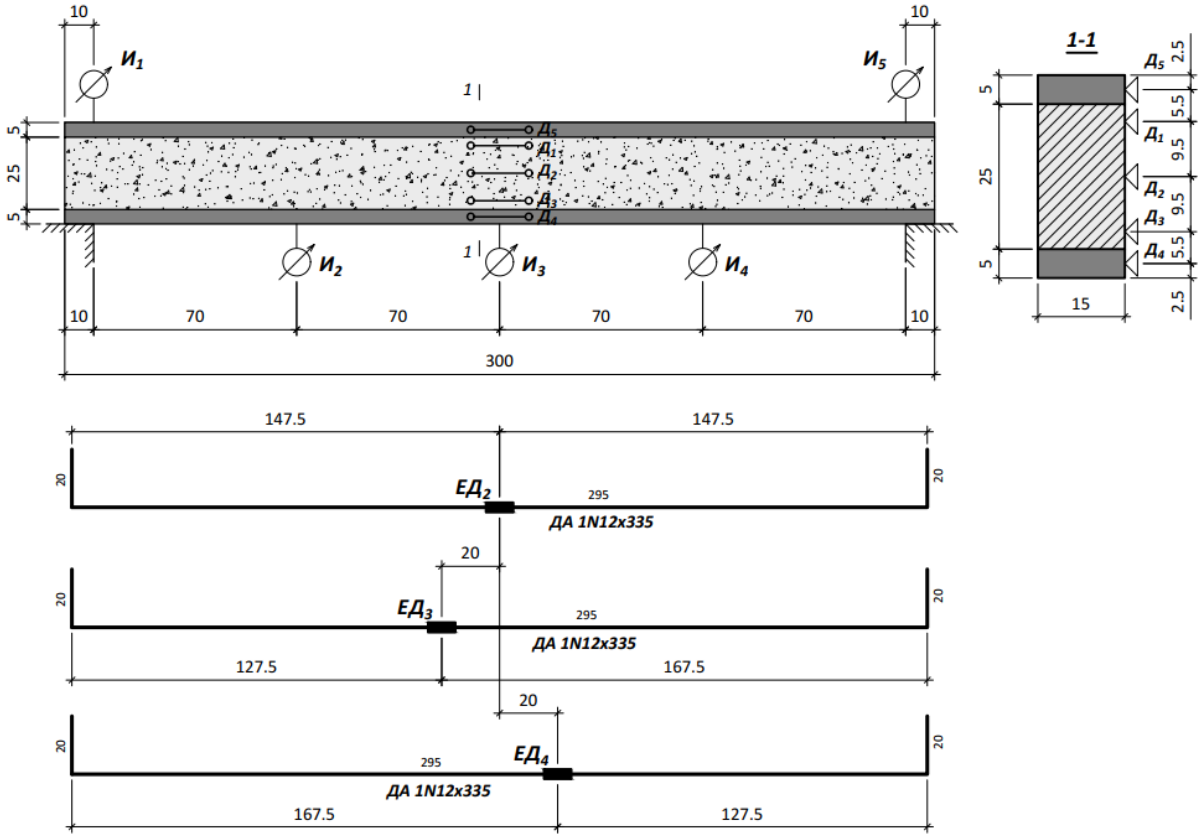
усилването гредата е изпитана статично до разрушение при статическа схема греда на две опори с отвор 2,80 m, натоварена с концентрирана сила в средата.

2.2. Измервателна апаратура

При изпитването са измервани следните величини:

- провисванията на гредата посредством часовникови индикатори - $И_i$, разположени при опорите, в четвъртините и в средата на отвора на гредата;
- относителните деформации в бетона в средното сечение чрез индуктивни датчици (LVDT) – $Д_i$, разположени на ниво долна и горна армировка и в средата на височината на сечението, а след усилване са добавени още два – в средите на усилващите слоеве;
- относителните деформации в долната армировка на гредата посредством електросъпротивителни деформоприемници - $ЕД_i$.

Разположението на уредите е показано на фигура 2.



Фигура 2. Разположение на измервателната апаратура

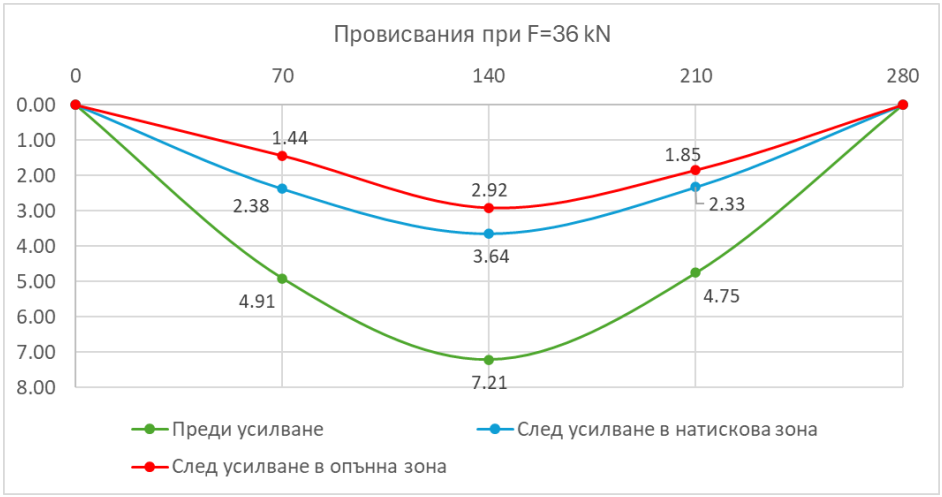
3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗПИТВАНЕТО

Представените в тази точка резултати, отнасящи се за неусилената греда и гредата след усилване в натисковата зона са взети от [10]. Резултатите за гредата след усилване в опънната зона са получени от настоящето експериментално изследване.

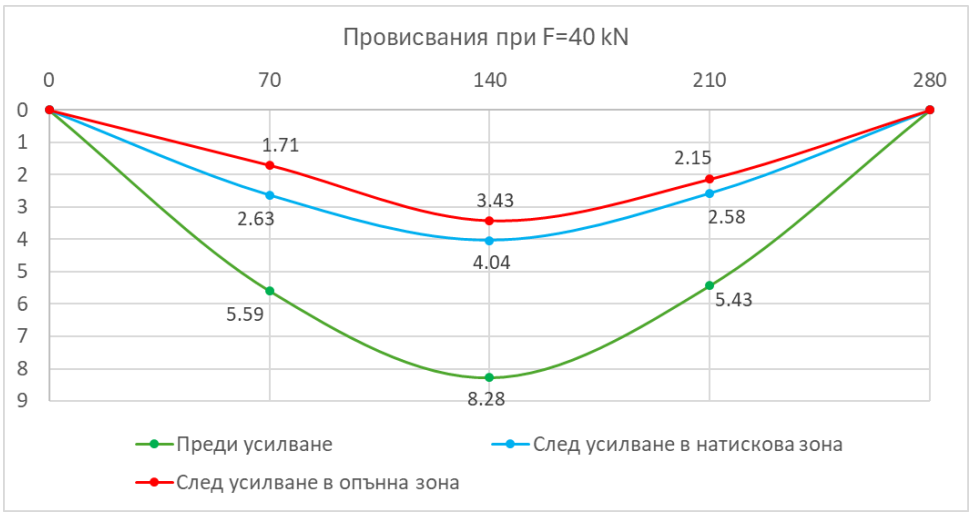
Теоретично определената сила, при която би се разрушила неусилената греда съгласно [10], е 47,51 kN. Получената стойност е изчислена съгласно методиката, дадена в БДС EN 1992-1-1 [27]. При изпитването на усиления в опънна зона опитен образец пълно разрушение настъпи при сила 90,80 kN. Следователно носещата способност на гредата след усилване в опънна и натисковава зона е 1,9 пъти по-голяма спрямо теоретично определената проектна стойност на неусилената греда. Трябва да се отбележи, че този резултат е постигнат при наличие на пукнатини в съществуващата греда преди усилване в опънната зона от предходното изпитване.

3.1. Провисвания

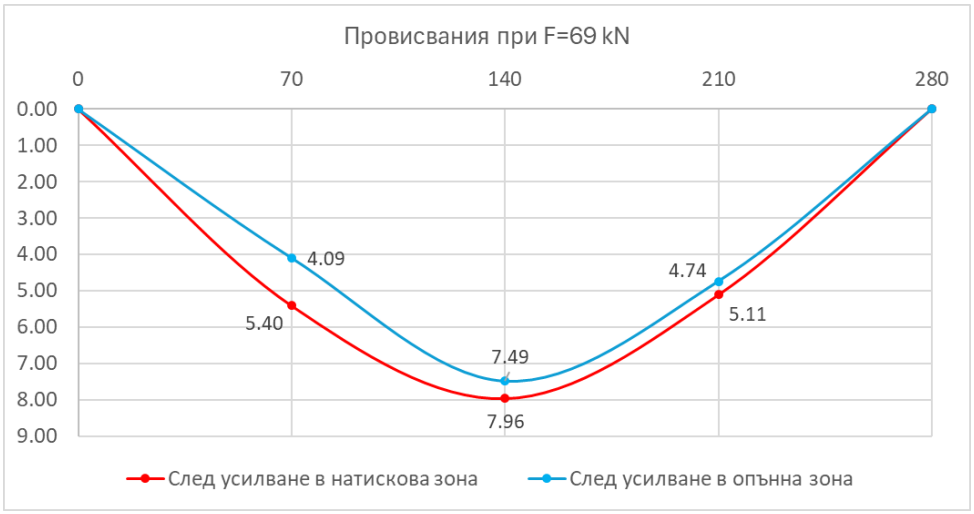
На фигури 3-6 са показани провисванията в гредата преди усилване, след усилване в натисковата зона и след усилване в опънната зона при различни степени на натоварване.



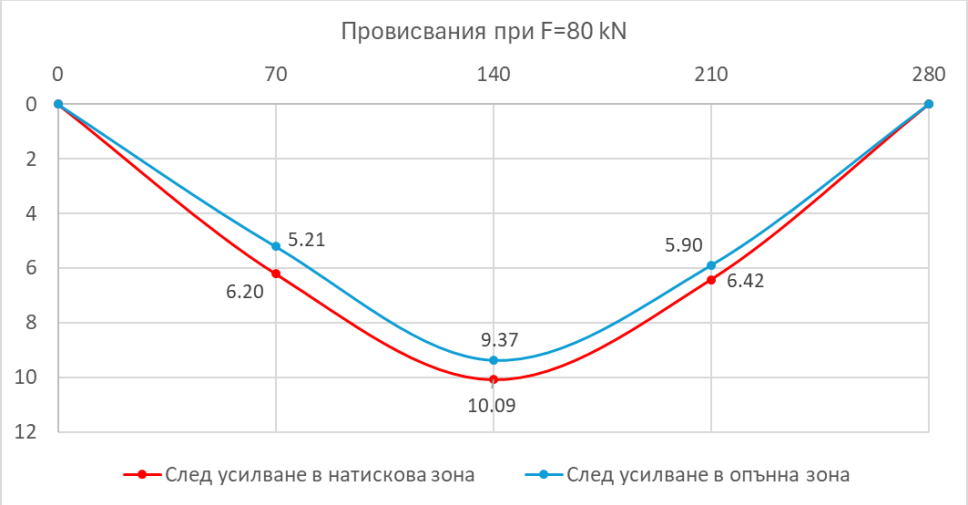
Фигура 3. Провисвания в гредата при сила F=36 kN



Фигура 4. Провисвания в гредата при сила F=40 kN

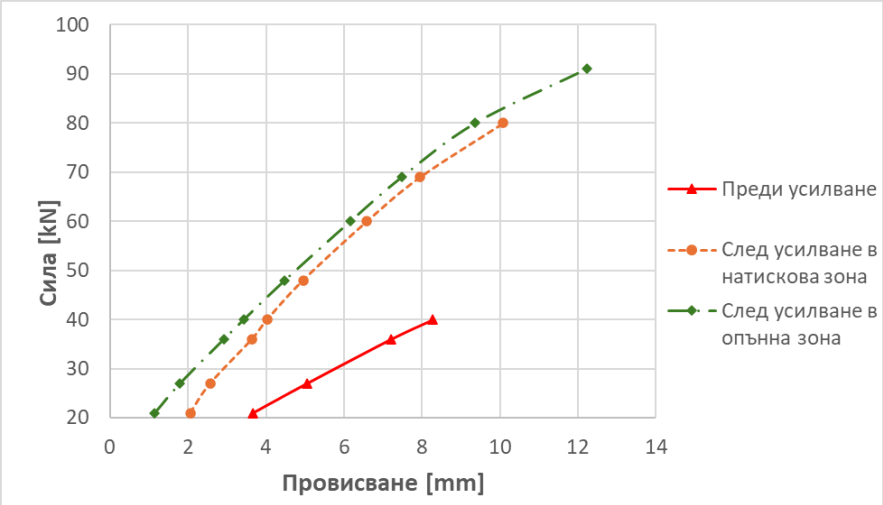


Фигура 5. Провисвания в гредата при сила F=69 kN



Фигура 6. Провисвания в гредата при сила F=80 kN

На фигура 7 е представено сравнение между провисванията в гредата преди усилване, след усилване в натискова зона и след усилване в опънна зона, а в таблица 1 са показани процентните разлики.



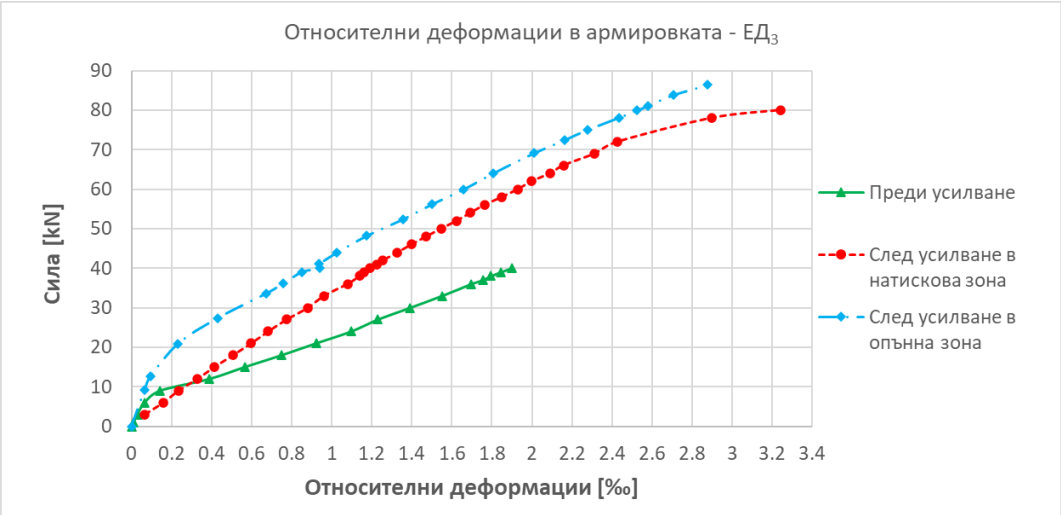
Фигура 7. Провисвания на гредата в средата на отвора

Таблица 1. Процентна разлика между провисванията в средата на отвора на гредата

F, [kN]	Спад на провисванията след усилване в натисковата зона спрямо преди усилване, [%]	Спад на провисванията след усилване в опънната зона спрямо преди усилване, [%]	Спад на провисванията след усилване в опънната зона спрямо усилване само в натисковата зона, [%]
21	43,73	68,66	44,31
27	49,01	64,46	30,29
36	49,48	59,47	19,78
40	51,27	58,54	14,93
48	-	-	9,49
60	-	-	6,45
69	-	-	5,91
80	-	-	7,08

3.2. Относителни деформации в армировката

Фигура 8 показва сравнение между относителните деформации в крайния армировъчен прът (ЕД$_3$) преди усилване, след усилване в натискова зона и след усилване в опънна зона. В таблица 2 са представени процентните разлики.



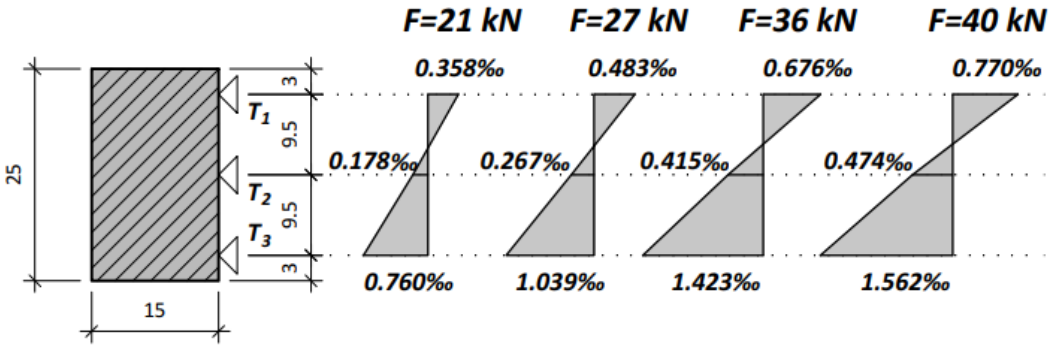
Фигура 8. Относителни деформации в армировката – ЕД$_3$

Таблица 2. Процентна разлика между относителните деформации в армировката – ЕД$_3$

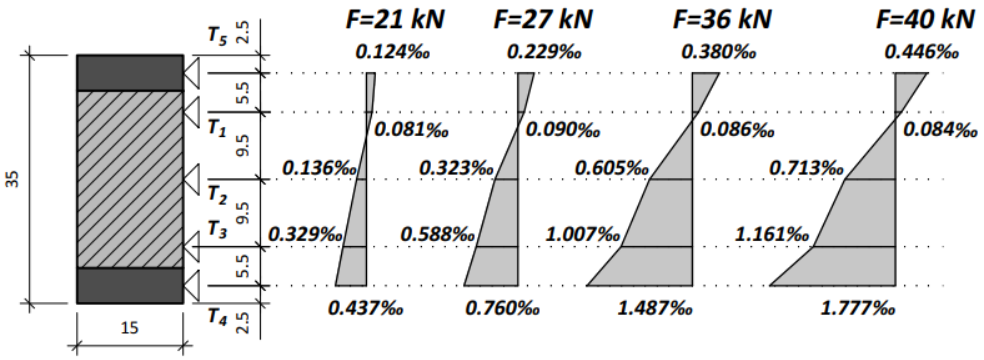
F, [kN]	Спад след усилване в натисковата зона спрямо преди усилване, [%]	Спад след усилване в опънната зона спрямо преди усилване, [%]	Спад след усилване в опънната зона спрямо усилване само в натисковата зона, [%]
21	35,14	74,73	61,04
27	36,99	65,12	44,65
36	36,45	55,24	29,56
40	37,28	50,58	21,20
48	-	-	20,05
60	-	-	14,20
69	-	-	13,06
80	-	-	22,04

3.3. Относителни деформации в бетона

На фигура 9 и фигура 10 са показани диаграми на относителните деформации в бетона в средното сечение на гредата спреди усилване и след усилване в натискова и опънна зона.

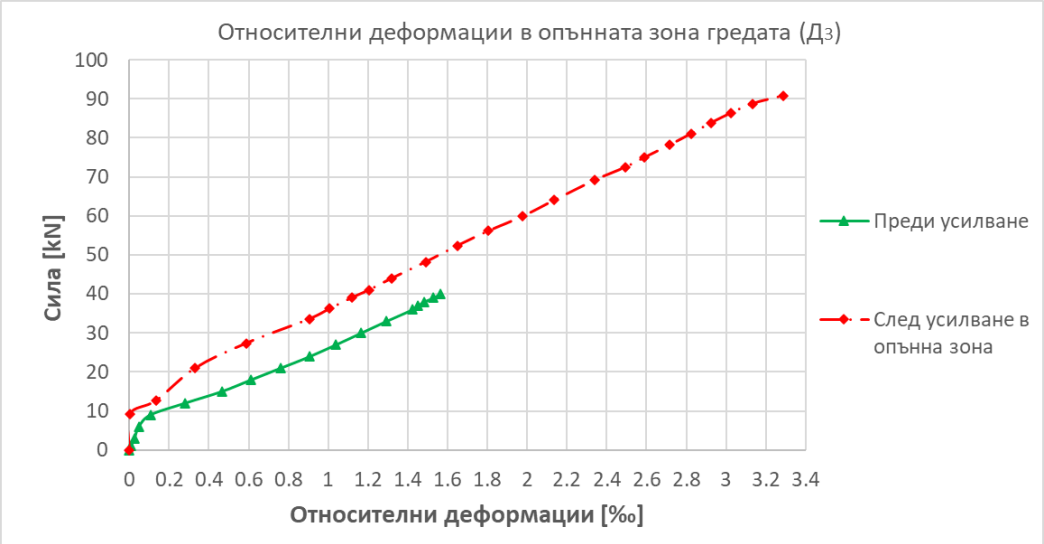


Фигура 9. Относителни деформации в бетона в средното сечение на гредата преди усилване



Фигура 10. Относителни деформации в бетона в средното сечение на гредата след усилване в натискова и опънна зона

Фигура 11 показва сравнение между относителните деформации в опънната зона на бетона в средното сечение (датчик Д3) преди усилване и след усилване в опънна зона. В таблица 3 са представени процентните разлики.



Фигура 11. Относителни деформации на бетона в опънната зона на гредата – Д3

Таблица 3. Процентна разлика между относителните деформации на бетона в опънната зона на гредата – датчик Д3

F, [kN]	Спад след усилване в опънната зона спрямо преди усилване, [%]
21	82,09
27	68,31
36	29,26
40	26,09

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от проведеното експерименталното изследване показват, че разгледаният в това проучване подход за усилване чрез изпълнение на усилващи слоеве от армиран с фибри високоякостен бетон в опънна и натискова зона е ефективен и рационален за повишаване на носещата способност и подобряване на експлоатационните качества на стоманобетонни мостови греди.

Усилената греда се разрушава при сила, която е 1,9 пъти по-голяма от аналитично определената разрушителна сила на неусилената греда. Този резултат е получен при увеличаване на височината на сечението с 40%.

Постигнато е голямо намаляване на провисванията в гредата (около 60%), което е изключително важно при мостовете с оглед на осигуряване на безпроблемно и комфортно пътуване на преминаващите превозни средства. В допълнение, налице е и спад в относителните деформации в армировката (50-75%). Интересно е да се отбележи, че сравнено с усилване само в натисковата зона, влиянието на усилващия слой в опънната зона по отношение на провисванията и относителните деформации в армировката намалява с увеличаване на натоварването. Тези резултати повдигат въпроса дали е оправдано да се изпълнява усилване в опънната зона, което е значително по-трудно от технологична гледна точка. Това означава, че би следвало да се вземе решение в конкретния случай в зависимост от големината на очакваните товари дали има необходимост да се прави усилване в опънната зона, или усилване в натисковата зона би било достатъчно. По-подробно анализиране на разликите между усилване само в натискова зона и усилване в натискова и опънна зона би представлявало интерес в бъдещи изследвания.

По отношение на относителните деформации в бетона също се наблюдава редукция, но отново тя намалява с увеличаване на натоварването.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящето експериментално изследване е част от научноизследователски проект по договор Д-158/24, финансиран от Център за научни изследвания и проектиране към Университет по архитектура, строителство и геодезия, град София.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС EN 1990:2003 Еврокод: Основи на проектирането на строителни конструкции.
[2] Димов Д, Георгиев А, Желев Ж, Някои поуки от обследването на пътни мостове в планинските райони у нас, Първа научно-приложна конференция с международно участие стоманобетонни и зидани конструкции – теория и практика – София, 2015.
[3] Иванчев И, Кисов Д, Решков М, Дефекти при стоманобетонни мостове в България и примери за ремонтирани съоръжения, Годишник на УАСГ, Юбилеен – 2007.
[4] Минев М, Димов Д, Жипонов К, Относно поддържането и ремонтите на софийските мостови съоръжения, Годишник на УАСГ, Юбилеен – 2007.
[5] Топуров К, Димов Д, Георгиев А, Петров Б, Насоки и методи за ремонти и саниране на големите виадукти по АМ „Хемус“ и АМ „Тракия“, Международна юбилейна научно-приложна конференция УАСГ, 2012.
[6] Топуров К, Димов Д, Георгиев А, Петров Б, Коларов В, Велинов К, Тревожни резултати от проучването на проявените дефекти и повреди на някои виадукти по АМ „Хемус“ и АМ „Тракия“, Международна научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, Варна, 2012.
[7] Топуров К, Стоманобетонни пътни и железопътни мостове, Том 2, АВС Техника, 2012, ISBN 978-954-8873-93-2.
[8] Стратегия за развитие на пътната инфраструктура в Република България 2016-2022, Министерство на регионалното развитие и благоустройството, Министерство на транспорта, информационните технологии и съобщенията.
[9] Манолова Е, Изследване влиянието на рецептурни и технологични фактори върху механичните свойства на супервисокоякостните бетони, дисертация, УАСГ, Artois University, 2014

[10] Трайкова М, Абдулахад Е, Възможности за приложение на супер високоякостни бетони (СВЯБ) за усилване на стоманобетонни греди – резултати от експериментално изследване, Годишник на УАСГ, 53(3), 2020, 611-621
[11] Huang Y, Grünewald S, Schlangen E, Luković M, Strengthening of Concrete Structures with Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC): A Critical Review, Construction and Building Materials, 336, 2022
[12] Manolova E, Zaharieva R, Petrov B, Nazarski D, Ultra High Performance Concrete – New Constructional Repair Material, 2nd WTA-International PhD Symposium, Brno, Czech Republic, 2011
[13] Nursyamsi N, Tarigan J, Abu Bakar B H, Hardjasaputra H, Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete an Alternative Material for Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures: A Review, Journal of Physics: Conference Series, 1529, 2020
[14] Paschalis S, Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete As Strengthening Material, Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2019
[15] Paschalis S, Lampropoulos A, Developments in The Use of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete As Strengthening Material, Engineering Structures, 2021
[16] Abbas H M, Kadhim M M A, Review of Behavior Flexural Strengthened RC Beams Using Ultra-High Performance Concrete, Salud Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias, 3, 2024
[17] Ahmed F B, Biswas R K, Sen D, Tasnim S, Flexural and Shear Strengthening of Reinforced-Concrete Beams with Ultra-High-Performance Concrete (UHPC), Construction Materials, 4, 2024, 468-492
[18] Abdal S, Mansour W, Agwa I, Nasr M Abadel A, Özkılıç Y, Akeed M, Application of Ultra-High-Performance Concrete in Bridge Engineering: Current Status, Limitations, Challenges, and Future Prospects, Buildings, 2023
[19] Bertola N, Bruhwiler E, A Review of the Use of UHPFRC in Bridge Rehabilitation and New Construction in Switzerland, Frontiers in Built Environment, 2021
[20] Graybeal B, Brühwiler E, Kim B, Toutlemonde F, Voo Y L, Zaghi A, International Perspective on UHPC in Bridge Engineering, Journal of Bridge Engineering, 2020
[21] Abdulahad E, Traykova M Basic recommendations for strengthening of RC beams with Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) – conclusions from experimental investigation, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020
[22] Иванов Я, Стоянов В, Иванова М, Високоякостни бетони, XII Международна научна конференция ВСУ, 2013, III(IV): 1-6
[23] Traykova M, Georgiev L, Ivanov S, Abdulahad E, Research in the application of UHPFRC for strengthening existing structures in Bulgaria, IABSE Congress, New York City, 2019, 2552–2558
[24] www. mapei.com/bg/bg/produkti-i-resheniya/spisak-s-produkti/podrobnosti-za-produkta/planitop-hpc, посетен на 12.11.2024
[25] БДС EN 1992-4:2018 Eurocode 2 - Design of Concrete Structures - Part 4: Design of Fastenings for Use in Concrete
[26] БДС EN 12190:2001 Продукти и системи за предпазване и възстановяване на бетонни конструкции. Методи за изпитване. Определяне на якост на натиск на разтвор за възстановяване
[27] БДС EN 1992-1-1:2005 Еврокод 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради