

ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАПРЕГНАТОТО И ДЕФОРМИРАНО СЪСТОЯНИЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ ГРЕДИ, УСИЛЕНИ С КАРБОНОВИ НИШКИ, ПРЕДИ И СЛЕД УСИЛВАНЕТО

Е. Абдулахад¹, В. Димов²

Ключови думи: възстановяване, усилване, стоманобетон, влакнестоармирани полимери, карбон

Научна област: усилване на стоманобетонни елементи с влакнестоармирани полимери

РЕЗЮМЕ

В строителната практика често се налага възстановяване и повишаване на носещата способност на елементи, които под въздействието на тежък товар са повредени. Съществуват множество методи за усилване. Като алтернатива на традиционните методи се явява усилването с влакнестоармирани полимери.

В тази статия са представени резултати от изпитване на три усилени стоманобетонни греди. Гредите са със сечение 20/40 cm и дължина 3 метра. При всички греди е използвана долна носеща армировка 3N16 – B500. Всяка греда е подложена на циклично натоварване до 50 000 цикъла, след което е натоварена статично до начало на разрушение. Извършено е подробно заснемане на получените пукнатини в гредите с цел да се изследва техният ефект върху поведението на елемента след усилване. Гредите са усилени с карбонови нишки, след което са подложени на статично изпитване до разрушение. Представени са резултати за поведението на гредите преди и след усилването. Въз основа на резултатите е направена оценка за ефективността на предложения метод за усилване.

1. Въведение

Има много традиционни начини за усилване на стоманобетонни елементи, като например стоманобетонни и метални кожуси. Въпреки предимствата на стоманобе-

¹ Емад Абдулахад, доц. д-р инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ 1, 1046 София, e-mail: georgosing@gmail.com

² Владимир Димов, инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ 1, 1046 София, e-mail: vdimov1124@gmail.com

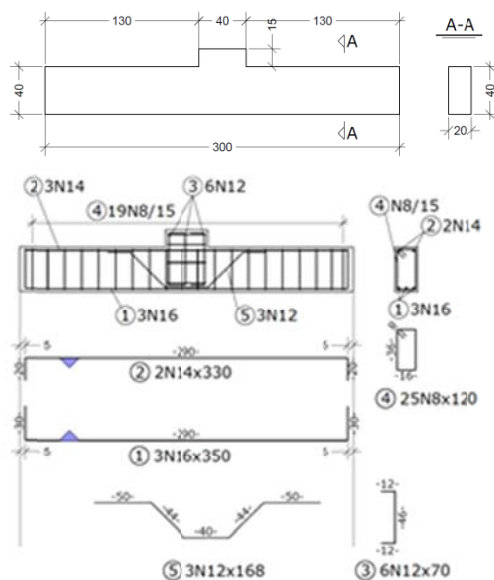
тонните кожуси да повишават коравината и носимоспособността на елементите, недостатък е голямото увеличаване на напречното сечение и трудоемкото изпълнение. Стоманените кожуси се нуждаят от сериозна корозионна защита. От друга страна, благоприятните механични свойства (якост и коравина) на влакнестоармираните полимери ги прави привлекателни за конструктивно възстановяване и усилване.

Много резултати от експериментални изследвания доказват, че усилването с влакнестоармирани полимери повишава носимоспособността на стоманобетонните елементи, подложени на монотонно и циклично натоварване [2], [6]. Общото при тези автори е, че те изследват поведението на усилените образци, в които не са налични повреди преди усилването и резултатите се съпоставят с контролни неусилени образци. В практиката често се налага усилване на елементи, при които са налице някакви дефекти [7], [8]. Наличието на пукнатини и големи остатъчни деформации в стоманобетонните елементи оказва влияние на ефикасността на усилването и съответно в поведението на усилваните елементи. Все още не е ясно поведението на елементи, при които усилването е изпълнено след наличието на повреди в тях. Тази статия изследва поведението на три стоманобетонни греди, в които са налични повреди в различна степен и има за цел да определи влиянието на повредите върху ефикасността на усилващата система.

2. Подготовка на образци

Изработени са три стоманобетонни греди. Използваните материали са бетон клас С 25/30 и стомана В500. Отчетената средна стойност за якост на бетона на натиск е 36,5 МПа. За стоманата е отчетено граница на провлачване при 524,5 МПа и скъсване при 631,8 МПа.

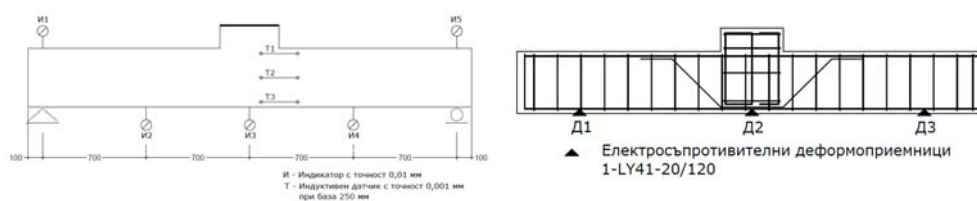
Всички образци са еднакви и са изготвени съгласно кофражния план и армировъчния план на фиг. 1 и фиг. 2.



Фиг. 1. Кофражен и армировъчен план

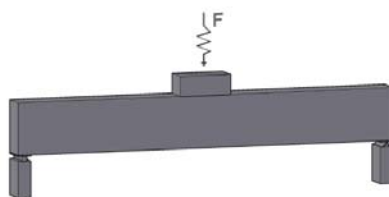
3. Измерителни уреди

Следенето на общите деформации се осъществява посредством механични часовникови индикатори с база 0,01 mm. Относителните деформации се следят посредством индуктивни датчици с точност 0,001 mm при база 250 mm в сечение на 200 mm от средното, където се получава рязка промяна в коравината на елемента. Относителните деформации в долната опънна армировка се следят посредством електросъпротивителни деформоприемници в средата на отвора и на разстояние 35 mm навътре от опорите. Поради повреда в датчика в средното сечение, деформациите в армировката на греда 2 не са отчетени.



Фиг. 2. Разположение на измерителните уреди

4. Схема на натоварването



Фиг. 3. Реализиране на натоварването

Всички образци са натоварени при една и съща схема на натоварване, но са повредени до различна степен преди усилването. Натоварването е реализирано на стъпки при следните основни етапи:

А) Натоварване на елемента преди усилване:

- 1) натоварване до характеристичен товар (90 kN);
- 2) подлагане на елемента на циклично натоварване с цел да се получи известно изчерпване на носимоспособността на елементите;
- 3) натоварване до начало на разрушение;
- 4) натоварване до характеристичен товар на повредените елементи.

В) Натоварване на елемента след усилване:

- 1) натоварване до характеристичен товар;
- 2) натоварване до изчислителен товар;
- 3) натоварване до разрушаване.

5. Възстановяване и усиление на повредените гредови елементи

Усилването се осъществява чрез прилагането на външно лепени влакнестоармирани тъкани. Използвани са карбонови влакна под формата на еднопосочно армирана тъкан и двукомпонентна епоксидна смола със следните характеристики:

Карбонови влакна

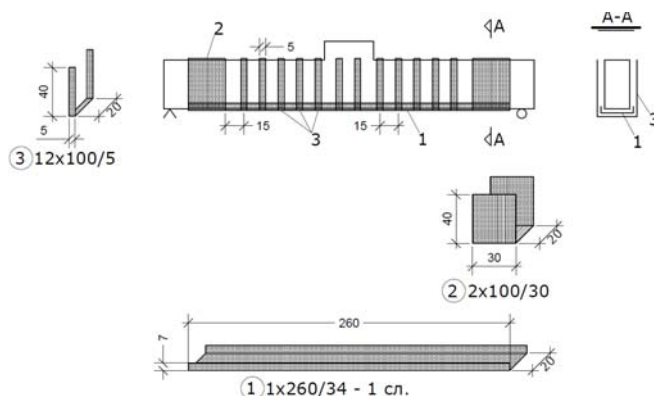
Якост на опън f_{fib}	3,800 MPa
Еластичност E_{fib}	235 GPa
Деформация при счупване ε_{fib}	1,5%

Епоксидна смола

Модул на еластичност при натиск	2,600 N/mm ²
Якост на опън	44,6 MPa
Удължение до разрушаване	1,7%
Якост на натиск	90 MPa
Якост на огъване	70 MPa
Модул на еластичност	2,500 MPa
Адхезия (към бетон)	> 4 N/mm ²

Преди усиляването повърхността се заглажда и изчиства. Ръбовете на стоманобетонното сечение се заоблят. Повърхностите, по които се предвижда да се залепят карбоновите нишки, се шпакловат с епоксидна шпакловка със следните характеристики:

<u>Двукомпонентна епоксидна шпакловка</u>	
Якост на натиск	$\geq 70,0 \text{ N/mm}^2$
Модул на еластичност	11,700 N/mm ²

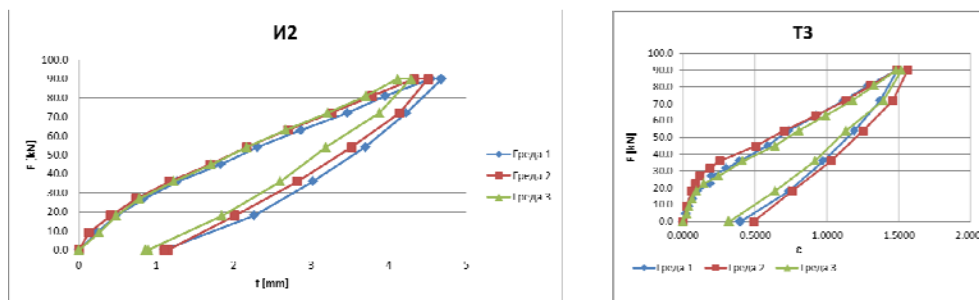


Фиг. 4. Схема на усиление

6. Резултати от проведеното изпитване

6.1. Поведение на неусилените гредови елементи

6.1.1. Натоварване до характеристичен товар (90 kN)

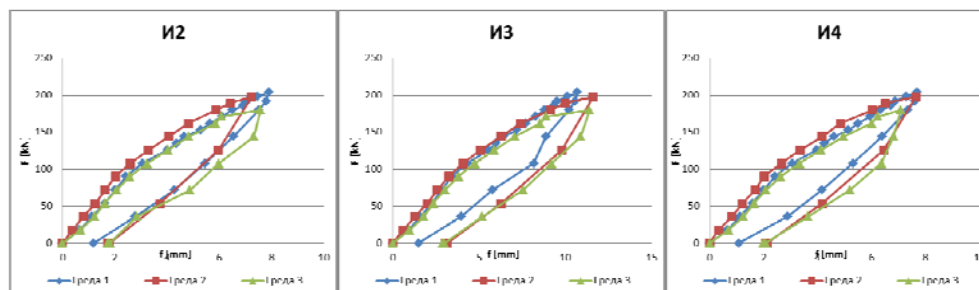


Фиг. 5. Провисване в средата на отвора и относителни деформации в бетона на ниво долна армировка

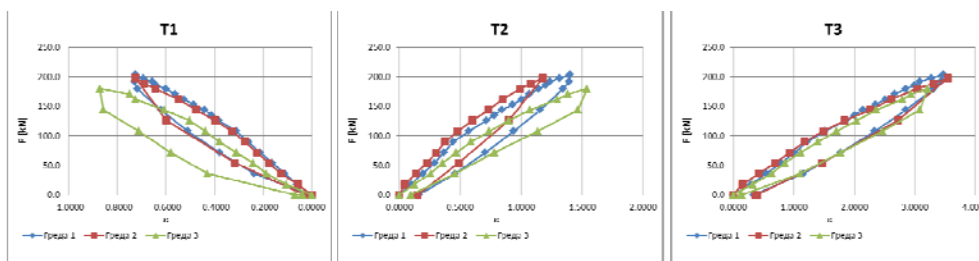
След натоварването до характеристичен товар елементите се подлагат на циклично натоварване. Параметрите на натоварването са показани в следната таблица:

Модел	Брой цикли	F_{min}	F_{max}	ΔF	Честота	Амплитуда
-	бр.	kN	kN	kN	Hz	μm
Греда 1	50 000	58.5	79.5	21	4	140
Греда 2	50 000	49.5	79.5	30	4	160
Греда 3	50 000	46.5	79.5	33	4	200

6.1.2. Натоварване до начало на разрушение

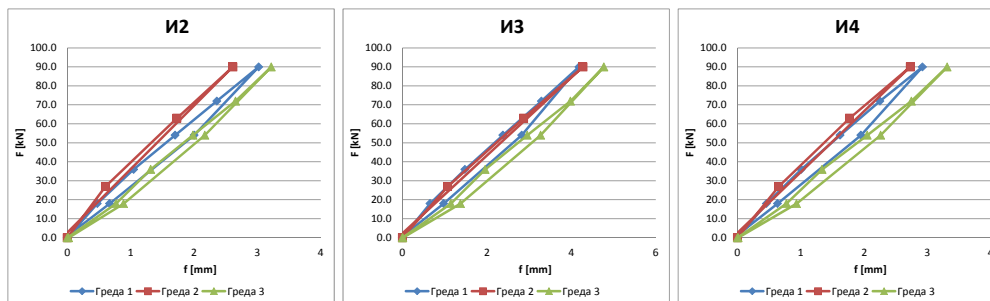


Фиг. 6. Провисване

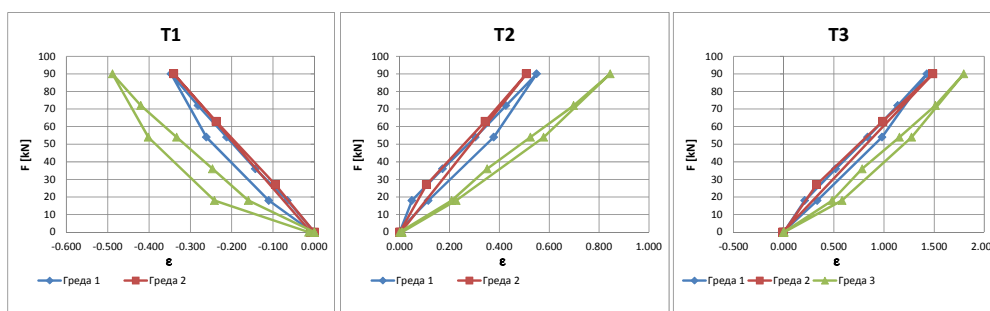


Фиг. 7. Относителни деформации в бетона

6.1.3. Натоварване на повредените елементи до характеристичен товар



Фиг. 8. Провисвания



Фиг. 9. Относителни деформации в бетона

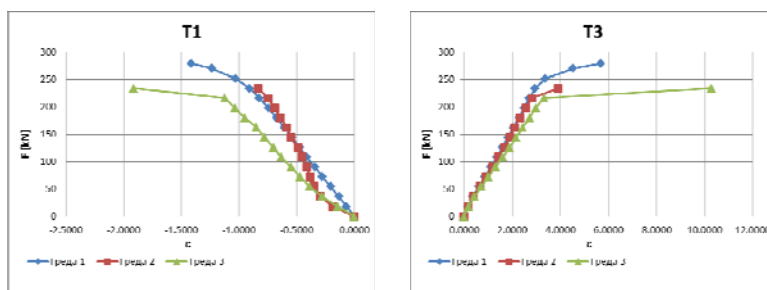
6.1.4. Отчитане на пукнатини

Пукнатините са водещ фактор при определяне на максималното натоварване в неусилените елементи. По този начин се постига различна степен на повреди в елементите и се търси връзка между степента на повреди в елементите и ефективността на усиливащата система.

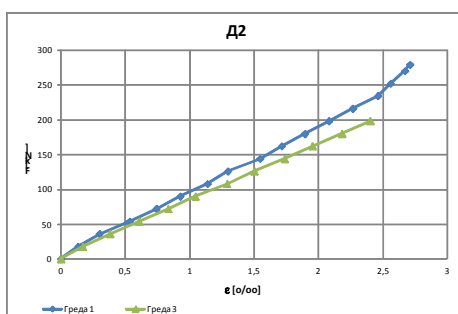
При всички греди главната пукнатина се образува в сечението с промяна в коравината. За греда 1 нейната максимална широчина е отчетена 0,55 cm. Обръща се внимание, че в греда 1 е отчетена максимална наклонена пукнатина при опората 0,65 mm, а нормалната пукнатина е 0,55 mm. След усиливането механизмът на разрушение е променен и развитие в наклонените пукнатини не се наблюдава. За греда 2 главната пукнатина е отчетена 1 mm, а за греда 3 е отчетена 1,5 mm.

		Греда 1						Греда 2							Греда 3						
Пукнатина	F [kN]	126	144	162	180	198	207	ина	108	126	144	162	180	198	207	ина	108	126	144	162	180
1	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1	0.20	0.30	0.35	0.35	0.40	0.60	1.00	1	0.20	0.20	0.25	0.30	0.35
2	0.20	0.20	0.40	0.50	0.55	0.65		2	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.50	0.50	2	0.20	0.15	0.20	0.25	0.30
3	0.25	0.30	0.30	0.50	0.50	0.55		3	0.20	0.25	0.25	0.25	0.30	0.35	0.35	3	0.25	0.35	0.35	0.40	1.50
4	0.30	0.30	0.30	0.35	0.35	0.40		4	0.15	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40	0.40	4	0.15	0.25	0.35	0.35	0.40
5	0.20	0.20	0.35	0.40	0.40	0.45		5	0.15	0.20	0.20	0.20	0.20	0.25	0.25	5	0.15	0.20	0.20	0.20	0.25
6	0.25	0.25	0.25	0.35	0.40	0.35		6	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	6	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
7	0.25	0.30	0.35	0.35	0.35	0.40		7	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.45	0.45	7	0.10	0.15	0.20	0.20	0.25
8	0.25	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40		8	0.15	0.20	0.30	0.30	0.30	0.35	0.35	8	0.10	0.15	0.20	0.20	0.25

Фиг. 10. Изменение на широчината на пукнатините в зависимост от степента на натоварването



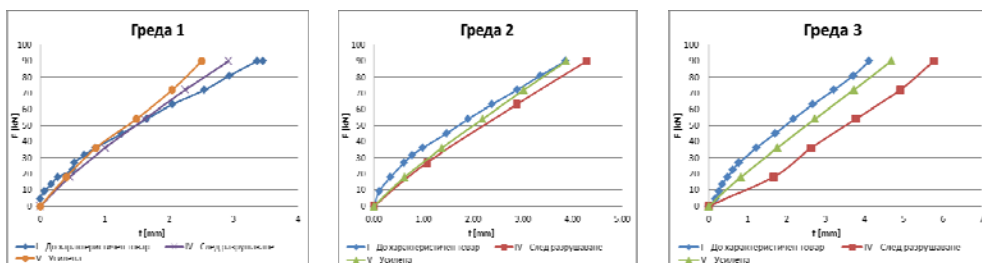
Фиг. 15. Относителни деформации в бетона



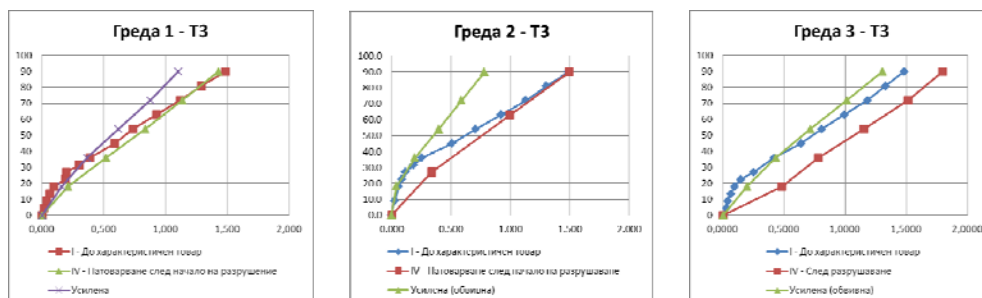
Фиг. 16. Относителни деформации в опънатата армировка в средата на отвора

6.3. Сравняване на поведението на елементите преди и след усилването

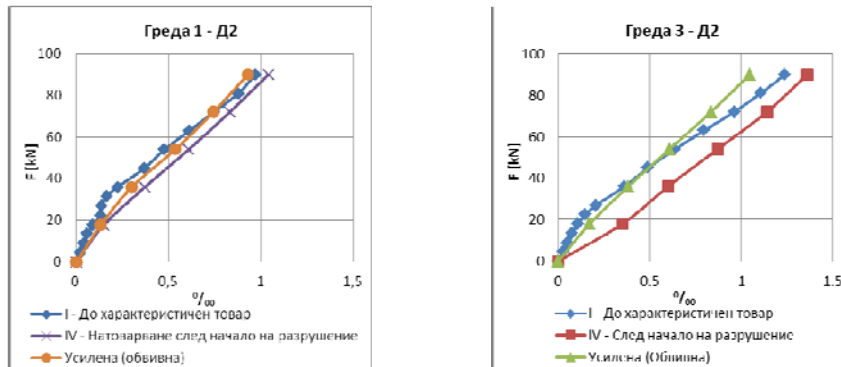
6.3.1. Натоварване до характеристичен товар



Фиг. 17. Провисвания в средата на отвора

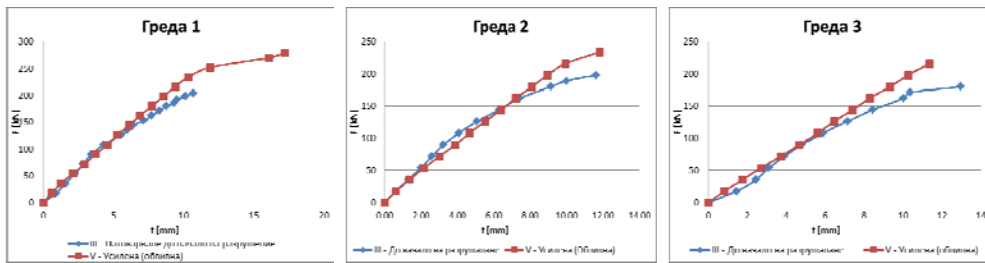


Фиг. 18. Относителни деформации в опънатата зона на бетона

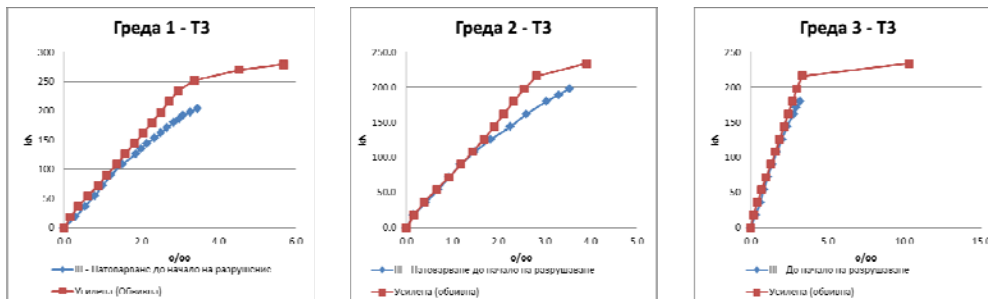


Фиг. 19. Относителни деформации в армивката

6.3.2. Натоварване до разрушаване



Фиг. 20. Провисвания в средата на отвора



Фиг. 21. Относителни деформации в бетона

7. Ефективност на усилящата система

Степен на натоварването	Греда 1			Греда 2			Греда 3		
	Неусилена	Усилена	Ефективност	Неусилена	Усилена	Ефективност	Неусилена	Усилена	Ефективност
F_k (90kN)	4,69	3,72	20,68 %	4,02	3,95	1,74 %	4,80	4,68	2,50 %
F_d (126 kN)	5,53	5,27	4,70 %	5,08	5,52	-8,66 %	7,14	6,47	9,38 %
F_d усилено (162 kN)	7,71	6,91	10,38 %	7,42	7,21	2,83 %	10,01	8,29	17,18 %
F_u	10,70	8,98	16,07 %	11,62	8,95	22,98 %	12,95	9,32	28,03 %

Фиг. 22. Провисване за ИЗ

Степен на натоварването	Греда 1			Греда 2			Греда 3		
	Неусилена	Усилена	Ефективност	Неусилена	Усилена	Ефективност	Неусилена	Усилена	Ефективност
F_k (90kN)	1,22	1,10	9,70 %	1,17	1,19	-1,21 %	1,40	1,30	6,70 %
F_d (126 kN)	1,86	1,58	15,02 %	1,84	1,68	8,40 %	2,04	1,88	7,58 %
$F_{d, усилена}$ (162 kN)	2,51	2,05	18,15 %	2,61	2,11	18,91 %	2,80	2,44	12,82 %
F_u	3,47	2,57	25,83 %	3,55	2,56	27,68 %	3,21	2,73	15,08 %

Фиг. 23. Относителни деформации в бетона за Т3

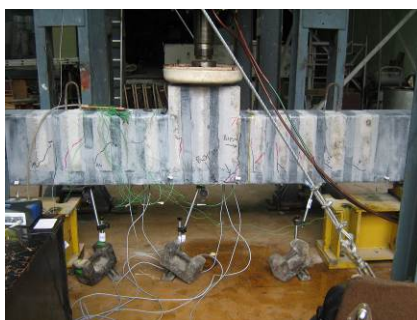
Степен на натоварването	Греда 1			Греда 3		
	Неусилена	Усилена	Ефективност	Неусилена	Усилена	Ефективност
F_k (90kN)	0,88	0,93	-6,06 %	1,20	1,05	13,12 %
F_d (126 kN)	1,34	1,30	2,92 %	1,75	1,51	14,20 %
$F_{d, усилена}$ (162 kN)	1,85	1,72	7,35 %	2,35	1,96	16,95 %
F_u	2,44	2,14	12,33 %	2,88	2,19	24,24 %

Фиг. 24. Относителни деформации в опънната армировка за Д2

8. Изводи

- Усилващата система успява да възстанови и увеличи първоначалната носеща способност на елементите.
- При по-ниски натоварвания, до нива около характеристичното, усилящата система работи в много малка степен. С увеличаване на натоварването се увеличава и ефективността на усилящата система, изразяваща се в редукция на първоначалните деформации.
- Широчината на първоначалните пукнатини оказва влияние върху носимоспособността на усилените елементи. При елементите с отчетени по-широки първоначални пукнатини, в гранично състояние ефективността на усилящата система е по-висока, но разрушението настъпва при по-ниски степени на натоварването.
- Поради доброто закотвяне в краищата и гъстите ивици FRP, които пристягат долния усилящ слой и не позволяват разрушението да настъпи с отделяне на FRP в крайна или средна зона, разрушението настъпва рязко със скъсване на долния усилящ плат в зоните на първоначално възникналите главни пукнатини в повредените елементи.
- Поведението на усилените елементи е линейно и разрушението настъпва рязко в зоната на първоначалната главна пукнатина.

Приложение – Снимков материал



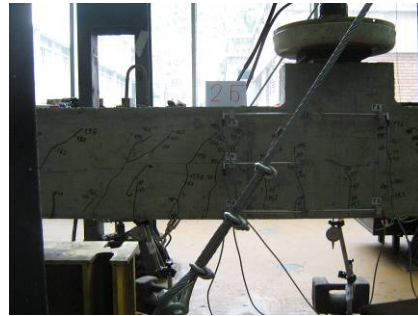
Разрушение в усилен елемент



Разрушение в усилен елемент



Пукнатини в повреден елемент



Пукнатини в повреден елемент



Усилен елемент



Определяне на относителни деформации посредством индуктивни датчици



Регистрираща апаратура



Полагане на усилващия плат



Изрязване на усилващия плат

ЛИТЕРАТУРА

1. *Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T. and Lam, L.* FRP Strengthened RC Structures. John Wiley & Sons, Ltd, England, (2002).
2. *Pham, H. and Al-Mahaidi, R.* Experimental Investigation into Flexural Retrofitting of Reinforced Concrete Bridge Beams Using FRP Composites. *Composite Structures*, 66(1-4), 617-625 (2004).
3. *Buyukozturk, O., Gunes, O. and Karaca, E.* Progress in Understanding Debonding Problems in Reinforced Concrete and Steel Members Strengthened Using FRP Composites. *International Journal of Construction and Building Materials*, 18(1), 9-19 (2004).
4. *Porter, M. L., Harries, K.* Future directions for research in FRP composites in concrete construction. *ASCE J Compos Constr* 2007;11:252–7.
5. *Rteil, A. A., Soudki, K. A., Topper, T. M.* Preliminary experimental investigation of the fatigue bond behavior of CFRP confined RC beams. *Constr Building Mater* 2007; 21(4):746–55.
6. *M. Kazem Sharbatdar.* Monotonic and cyclic loading of new FRP reinforced concrete cantilever beams. *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 6. No. 1. pp. 58-71. March 2008.
7. *Абдулахад, Е., Д. Паничков, Н. Баракова, Б. Николова.* Изследване на носещата способност на стоманобетонна греда с Т-образно сечение усилена с композитни материали.
8. *Абдулахад, Е., П. Христов, Д. Паничков.* Напрегнато и деформирано състояние на дефектирала стоманобетонна греда с плочогредово сечение, усилена с карбонови нишки.
9. *Трайкова, М, Т. Чардакова.* Избрани теми по избираема дисциплина „Диагностика, възстановяване и усиляване на сгради“ за специалност ССС (IX семестър).

Постъпила: април 2015 г.

STUDY OF STRESS AND STRAIN STATE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS, STRENGTHENED WITH CARBON FIBERS, BEFORE AND AFTER STRENGTHENING

E. Abdulahad¹, V. Dimov²

Keywords: recovery, strengthening, reinforced concrete, fiber reinforced polymers, carbon

Research area: strengthening of reinforced concrete elements with fiber reinforced polymers

ABSTRACT

In construction practice it is often necessary to recover and increase the bearing capacity of elements damaged while subjected to heavy load. There are many methods for strengthening. An alternative to the traditional methods is the strengthening with fiber reinforced polymers.

This paper presents the results of testing three strengthened reinforced concrete beams. The beams have a section of 20/40 cm and a length of 3 meters. In all beams lower support reinforcement 3N16 – V500 is used. Each beam is subjected to cyclic loading up to 50 000 cycles, followed by a static charge until the start of destruction. A detailed capture of cracks in the resulting beams is conducted in order to investigate their effect on the behaviour of the element after strengthening. The beams are reinforced with carbon fiber and then subjected to static test until destruction. The results of the behaviour of the beams before and after strengthening are presented. Based on the results, the effectiveness of the proposed methods for strengthening is estimated.

¹ Emad Abdulahad, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: georgosing@gmail.com

² Vladimir Dimov, Eng., Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: vdimov1124@gmail.com

