

ТЕХНОЛОГИЧНИ ОСОБЕНОСТИ ПРИ УСИЛВАНЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ ПЛОЧИ ЧРЕЗ ВЪНШНО ПРЕДВАРИТЕЛНО НАПРЯГАНЕ

Георги Иванов¹, Иван Хр. Павлов²

TECHNOLOGICAL FEATURES IN STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE SLABS BY EXTERNAL PRESRESSING

Georgi Ivanov¹, Ivan Hr. Pavlov²

Abstract:

Structures often need to be strengthened due to damages and failures, functional changes, or increased regulatory requirements. External prestressing is one of the most effective methods in structural and technological terms for strengthening of reinforced concrete structures. This technique is effective to increase the load-bearing capacity of the structural elements without increasing the cross-sectional dimensions, and the increase in the weight of the structure is negligible. The technology of execution is fast and there is no need to interrupt the technological process.

The present paper aims to present the technological stages for strengthening of reinforced concrete slabs by external prestressing. The specific moments of the process have been clarified, focusing on the technological features of the execution using different strengthening systems. Some general conclusions are drawn from analysis that can improve the quality and safety of work.

Keywords:

Reinforced Concrete Slabs, Strengthening, External Prestressing, Technological Features.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Външното предварително напъгане е един от най-разпространените методи за усилване на стоманобетонни плочи и е практически приложим, когато има нужда от [1]:

- промяна на конструктивната система, например премахване на колона, чиято реакция е заменена от девиаторната сила на напъгащата система (фиг. 1);

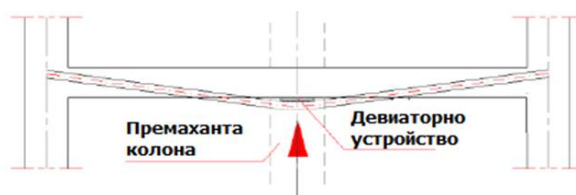
¹ Георги Иванов, докторант, катедра „Технология и механизация на строителството“, Строителен факултет, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ № 1, 1046 София, *e-mail*: givanov_fce@uacg.bg;

Georgi Ivanov, PhD Student, Department of Construction Technology and Mechanization, Faculty of Structural Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., 1046 Sofia, Bulgaria; *e-mail*: givanov_fce@uacg.bg.

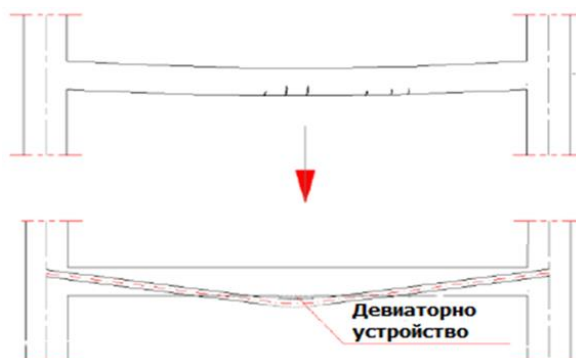
² Иван Хр. Павлов, доц. д-р инж., катедра „Технология и механизация на строителството“, Строителен факултет, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ № 1, 1046 София, *e-mail*: pav_fce@uacg.bg;

Ivan Hr. Pavlov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Department of Construction Technology and Mechanization, Faculty of Structural Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., 1046 Sofia, Bulgaria; *e-mail*: pav_fce@uacg.bg.

- значително увеличение на огъвателната носимоспособност на плочата;
- подобрене на експлоатационното състояние, например при прекомерни провисвания и пукнатини (фиг. 2).

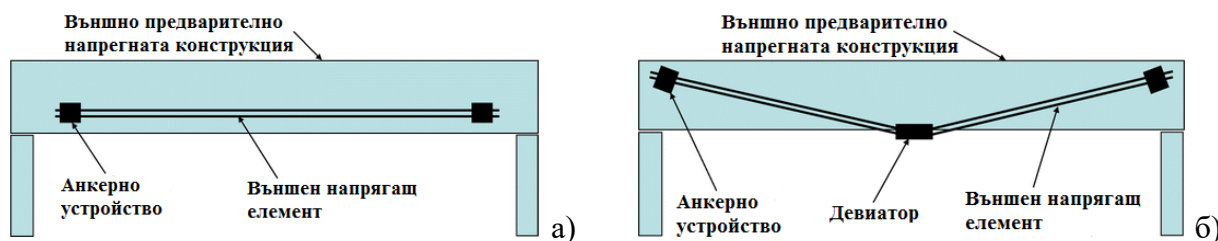


Фигура 1. Усилване на стоманобетонна плоча при премахване на колона от конструктивното поле [1]



Фигура 2. Усилване на стоманобетонна плоча при прекомерно провисване и пукнатини [1]

При външното предварително налягане, налягащите елементи се разполагат отвън на бетонното сечение (фиг. 3), а налягащата сила се предава на конструкцията единствено чрез анкерните и девиаторни устройства [2, 3].



Фигура 3. Външно разположен налягащ елемент [4]: а) с праволинеен профил, б) с полигонален профил

Тази технология има следните важни предимства [4, 5]:

- значително се увеличава носимоспособността на огъване и срязване в конструктивните елементи;
- намаляват се недопустимите и големи пукнатини и се контролира образуването на нови пукнатини по време на експлоатация;
- увеличава се коравината, която от своя страна намалява деформациите и вибрациите в конструкцията;
- теглото на налягащата система е относително малко, като увеличението на собственото тегло на конструкцията е незначително;
- бързина на изпълнение (максимален период – до няколко дни); прилага се без прекъсване на технологичния процес;

- напрегащите елементи могат лесно да се инспектират по време и след инсталирането им, т.е. има постоянен мониторинг върху напрегащата система;
- поради липсата на връзка между конструкцията и напрегащите елементи, може да се коригира напрегащата сила в тях или да се заменят, ако възникне какъвто и да е проблем като скъсване или корозия;
- технологията е икономична и съответно с конкурентна цена в сравнение с други методи за усилване.

Напрегащите елементи са от несвързан тип, т.е. нямат сцепление с бетона, и могат да бъдат:

- въжета от високоякоствана армировъчна стомана;
- пръти от високоякоствана армировъчна стомана;
- пръти от обикновена армировъчна стомана, работещи по шпренгелна система;
- въжета или ивици от FRP материали.

Важно е да се отбележи, че FRP и стоманата имат различни характеристики и различно поведение при натоварване. В табл. 1 е направено кратко сравнение между стомана, GFRP, AFRP и CFRP. Експерименталните тестове показват, че стоманобетонни елементи, усилен с FRP имат почти същото поведение като тези усилен със стомана, което е видно от сходния характер на диаграмите „натоварване-преместване“ [6].

Напрегащите елементи от FRP не притежават дуктилност при екстремни натоварвания за разлика от стоманата. Това означава, че елементи, усилен с FRP могат едновременно да осигуряват по-голяма носимоспособност при крайно гранично състояние и по-ниско дисипиране на енергия, отколкото тези, усилен със стомана [7].

Таблица 1. Характеристики на напрегащи елементи от стомана и FRP [8]

Характерни свойства	Стомана (ASTM Grade 270, Euronorm Fe7S1860)	GFRP Glassline [®]	AFRP Arapree [®]	CFRP Leadline [®]
Обем дял на влакната (%)	---	65	50	65
Плътност (g/cm ³)	7,85	2,15	1,25	1,6
Якост на опън при 20°C (MPa)	1860	1500	1490	1840
Модул на еластичност при 20°C (GPa)	195	50	62	147
Удължение при скъсване (%)	>3,5	3,0	2,4	1,3
Коефициент на надлъжно температурно разширение (10 ⁻⁵ /°C)	12	5,2	-1,8	0,68
Коефициент на напречно температурно разширение (10 ⁻⁵ /°C)	12	~35	~35	~20
Намаление на якостта след 100 години натоварване (%)	~0	30	35	~0
Релаксация при 20°C (%)	3	4	>30	3

Прилагането на конкретна система за външно предварително напрегане при усилване на стоманобетонни плочи зависи от няколко фактора: конструктивни цели на усилването, място на прилагане и архитектурни изисквания.

В България все още не се прилага външното предварително напрегане за усилване на стоманобетонни плочи в сгради, като настоящата разработка има за цел да даде практически насоки при използването на този метод. Статията представя някои технологични особености при различните етапи от изпълнението на този вид усилване чрез системи, използващи високоякоствени стоманени въжета.

2. ТЕХНОЛОГИЧНИ ЕТАПИ И СПЕЦИФИЧНИ ОСОБЕНОСТИ ПРИ УСИЛВАНЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ ПЛОЧИ ЧРЕЗ ВЪНШНО ПРЕДВАРИТЕЛНО НАПРЯГАНЕ

Външното предварително напъгане при усилване на стоманобетонни плочи е процес, при който напъгащата армировка и приспособленията от усилващата система се разполагат обикновено отдолу на плочата, като при напъгането тя ефективно се повдига нагоре. Напъгащата армировка трябва да притежава висока опънна якост и дуктилност, като най-често се използват стоманени въжета. Въжетата се произвеждат от единични струни, усукани по между си. Тъй като струните обикновено са с малки диаметри, въжетата притежават по-добри свойства от единичните високоякостни пръти, поради добрия контрол на качеството при производство. С тях също се работи по-лесно благодарение на по-голямата гъвкавост, отколкото с единични пръти със същия диаметър.

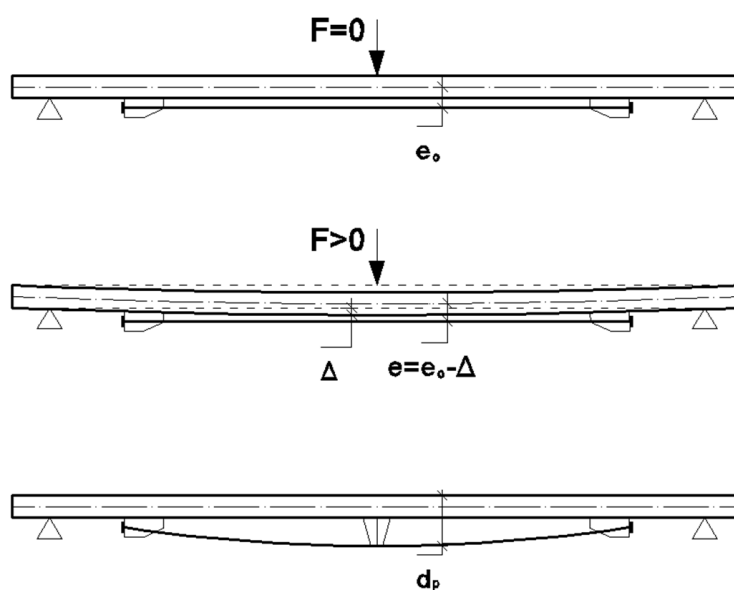
2.1. Разположение на напъгащите елементи

Разположението на напъгащите елементи може да е по линейна или полигонална траектория, като при последната се изисква приемането на отклонителна точка. Изборът на профил на напъгащите въжета зависи от целите на усилването и трябва да се извърши в съответствие със следните инструкции:

- Ситуация 1 (премахната колона) – траекторията трябва да е полигонална с девиаторно устройство в зоната на премахнатата колона;
- Ситуация 2 (коригиране на деформации/пукнатини) – може да бъде използван линейен или полигонален профил на напъгащата армировка.

При праволинеен профил на напъгащите въжета, връзката им с бетона е само в анкерните устройства, като деформацията на въжетата не следва напълно тази на плочата. По този начин се появяват ефекти от втори ред, което води до намаляване на напъгащата сила, а от там и на носимоспособността на конструкцията. За да се намалят тези ефекти трябва да се спазват следните изисквания:

- при отношение отвор/ексцентрицитет по-малко от 20, т.е. $L/e < 20$, трябва да се използва поне един девиатор; при $L/e > 20$ са необходими два или повече девиатора [9] (фиг. 4). В посочените отношения с L е означен отвора на полето, а с e разстоянието между тежестните оси на въжетата и плочата;
- разстоянието между девиаторните точки не трябва да надхвърля 12 пъти полезна височина на въжетата d_p [10].



Фигура 4. Напъгане на плоча с въжета с праволинеен или полигонален профил

За да се избегнат недопустими вибрации в напрегащите въжета, дължината между точките на отклонение на армировката трябва да бъдат ограничени до $7 \div 8$ m [11]. Ако това разстояние надхвърля 12 m, първата форма на трептене на въжетата, отчитаща вибрациите между отклонителните точки, не трябва да попада в диапазона $0,8 \div 1,2$ пъти от тази на конструкцията [10].

С цел да се предпази армировката, както и защитните ѝ покрития (PE обвивка) от прекомерни напрежения, минималният радиус на огъване в зоната на девиатора може да се определи по следната формула [12]:

$$R_{min} = (1,3 \div 1,5) \sqrt{f_{pk} \cdot A_p} \geq 20 \text{ m}, \quad (1)$$

където: f_{pk} е характеристичната якост на опън на напрегащата армировка, а A_p - площ на напречното сечение на напрегащата армировка.

Анкерното устройство трябва така да се позиционира, че резултантната на силите да е в масовия център на конструктивния елемент. Ако това не е възможно поради геометрични ограничения или нужда от голям ексцентрицитет, са възможни следните решения: увеличаване на дебелината на плочата в анкерната зона (фиг. 5а), изпълнение на стоманобетонни анкерни блокове (фиг. 5б) или използване на стоманено анкерно устройство (фиг. 5в).

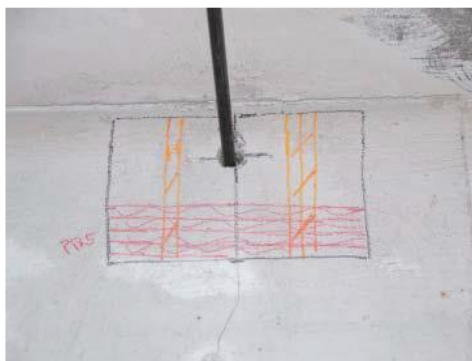


Фигура 5. Различно разположение на анкерни устройства [1]

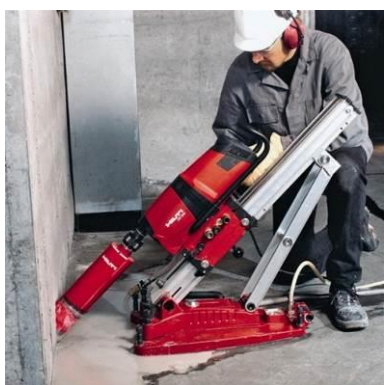
2.2. Изрязване и пробиване на отвори

Почти всички системи за външно предварително напрегане на плочи изискват пробиване и/или изрязване на отвори в съществуващи стоманобетонни елементи (колони, греди, стени и др.). Много важно е предварително схематично да се нанесе усилващата система върху съществуващата конструкция и да се определи приемливото местоположение на отворите и анкерирането на въжетата. Често усилваните конструкции са стари и липсват оригиналните конструктивни чертежи, което налага използване на рентгенографски метод за определяне на съществуващата армировка, особено за предварително напрегнати конструкции. Рентгеновият оператор използва негативите, за да начертае върху бетонната повърхност точното местоположение на армировката в конструктивния елемент (фиг. 6).

Направата на отвори в конструктивните елементи е наложително да се извършва от опитен и висококвалифициран персонал. Работниците трябва незабавно да установят кога са достигнали армировка или канлообразувател на високоякостна армировка. При пробиването на отвор е много по-малко вероятно да се скъса високоякостна армировка и обикновено не е възможно да се компрометира обикновената армировка, за разлика от изрязването на отвор. За изрязване на отвори в бетон се използва диамантено пробивна машина, а за пробиване – бормашина (фиг. 7).



Фигура 6. Реално разположение на напрягаща армировка и стремена в конструктивен елемент, след извършена рентгенография [13]



а) изрязване на отвор [14]

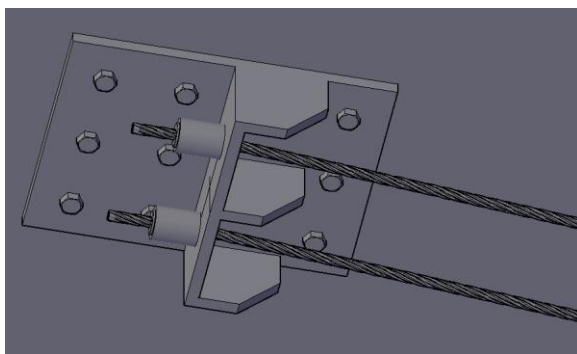


б) пробиване на отвор [13]

Фигура 7. Направа на отвори в конструктивни елементи за преминаване на напрягаща армировка от усилваща система

2.3. Анкерирание на напрягащите елементи

За анкерирание на напрягащите въжета най-често се използват стоманени елементи, които са проектирани така, че да поемат хоризонтални и вертикални сили и да ги предават на усилвания елемент. Проектното местоположение на анкерните и девиаторни устройства е съобразено освен със схемата на усилване, така и с разположението на армировката в плочата (фиг. 8а). При анкерирание в колона трябва да се провери дали конструктивния възел на колоната с плочата или гредата може да поеме допълнителното натоварване (фиг. 8б).



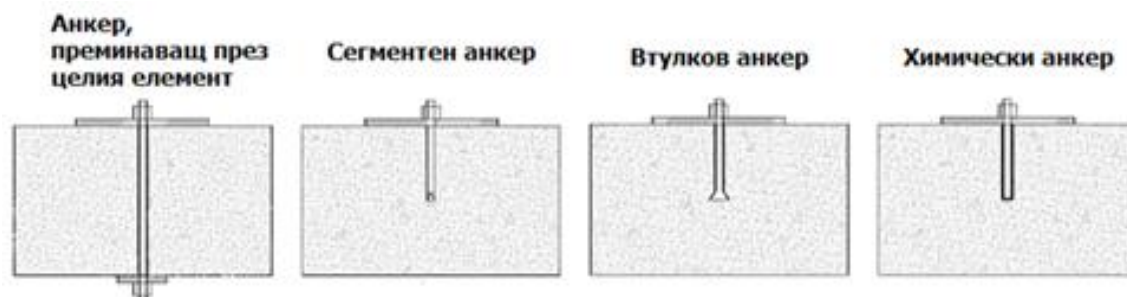
а) анкерирание в плоча



б) анкерирание в колона [13]

Фигура 8. Анкерирание на напрягащи въжета от усилваща система

Стоманените анкерни и девиаторни устройства се закрепват към бетона посредством анкери. Най-често срещаните типове анкериране са показани на фиг. 9, като масово се прилагат шпилки или болтове, преминаващи през цялата дебелина на плочата. По-рядко се използват химическите (адхезионни) анкери.



Фигура 9. Най-често срещаните типове анкериране на метални елементи към бетон [1]

2.4. Реализиране на напрегащата сила

Напрягането на високоякостните стоманени въжета се реализира най-често с ръчни хидравлични преси с прихващащо действие. Те позволяват да се напрягат единични въжета (фиг. 10).



Фигура 10. Преса с прихващащо действие за напрягане на единични въжета [13]



Фигура 11. Противопожарна защита от специална мазилка, нанесена върху външно напрегнато въже [13]

2.5. Защита на напрегащите елементи

Околната среда и функцията на усилващата система определят необходимостта от защита срещу корозия и пожар на въжетата и приспособленията от напрегащата система. Във влажна и агресивна среда често се прилага галванизирание и понякога нанасяне на специални грундове (цинкови, епоксидни и силиконови) и лакове (винилови и епоксидни). При проектирането трябва да се отчете, че поцинковането чрез галванизирание намлява граничната якост на въжетата. За противопожарна защита (фиг. 11) се използват пожарозащитни бои (набъбващи при нагряване – латекси, силиконов каучук и фенолформалдехидни смоли), мазилки (смес от вермикулит, минерални добавки и свързващи вещества) и облицовки (плочи от каменна вата или гипсовлакнести плочи, подсилени с алуминиево фолио).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При усилването на стоманобетонни плочи чрез външно предварително напрягане се разглеждат няколко аспекта, които трябва да бъдат разбрани за правилното му прилагане. Тези аспекти се отнасят до характеристиките на външното напрягане, като отчитане на ефектите от втори ред, правилната оценка на носимоспособността на усилените елементи, както и избора на подходящ профил на напрягаща армировка за конкретния случай.

С представените в статията специфични особености от основните технологични етапи, се постига разбиране на процеса при този вид усилване на стоманобетонни плочи. По този начин се постига ефективност от прилагането на метода и се подобрява качеството и сигурността на работа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Preto, P.B. Guidelines for External Prestressing as Strengthening Technique for Concrete Structures [Official site]. Instituto Superior Tecnico, 23.03.2018, <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/844820067123479/GrandeEdificiodoOrienteEA.pdf>.
- [2] Gerwick, B. Construction of Prestressed Concrete Structures. Second Edition. John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [3] Nordin, H. Strengthening structures with externally prestressed tendons – Literature Review. Lulea University of Technology, Technical Report, June, 2005.
- [4] Khudeira, S. Strengthening of Deteriorated Concrete Bridge Girders Using an External Post-tensioning Systems. //ASCE. Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 15, Issue 4, November, 2010.
- [5] Picard, A., Massicotte, B. and Bastien, J. Relative Efficiency of External Prestressing. //Journal of Structural Engineering, Vol. 121, Issue 12, December, 1995.
- [6] Mutsuyoshi, H. et al. Behavior of Prestressed Concrete Beams Using FRP as External Cable. Japan Concrete Institute, Vol. 13, 1991.
- [7] Stoll, F. et al. Experimental Study of CFRP-Prestressed High-Strength Concrete Bridge Beams. //Composite Structures, Vol. 49, Issue 2, June, 2000.
- [8] Pisani, M. A Numerical Survey on the Behavior of Beams Pre-stressed with FRP Cables. //Construction and Building Materials, Vol. 12, Issue 4, June, 1998.
- [9] Tan, K.H. et al. External Prestressing in Structures. National University of Singapore, Final Report, July, 1997.
- [10] BD 58/94. The Design of Concrete Highway Bridges and Structures with External Unbonded Prestressing. Design Manuals for Roads and Bridges 1, Section1, Part 9, 1995.
- [11] Bruggeling, A. S. G. External Prestressing: A State of the Art. American Concrete Institute, Vol. 120, 1990.
- [12] Neves, S. M. P. Pré-esforço exterior no reforço de estruturas. Tese de Mestrado, Faculdade de ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [13] Bondy, D. K. Externally Applied Post-Tensioning Systems. //Structure Magazine, July, 2005.
- [14] HH Ltd. Diamond Core Drill [Official site]. Hire Here Ltd., 17.04.2018, <https://www.hirehere.ie/diamond-core-drill>.