

ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ – СОФИЯ

Първа научно-приложна конференция с международно участие  
„СТОМАНОБЕТОННИ И ЗИДАНИ КОНСТРУКЦИИ – ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА“

22 – 23 октомври 2015

22 – 23 October 2015

First Scientific-Applied Conference with International Participation

“REINFORCED CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES – THEORY AND PRACTICE”

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY – SOFIA

48 <sup>ТОМ</sup>  
vol.

2015

св. 12 – I  
fasc.

## ОСОБЕНОСТИ В ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НОСИМОСПОСОБНОСТТА НА СТОМАНОБЕТОННИ ГРЕДИ С НАПРЯГАЩА АРМИРОВКА БЕЗ СЦЕПЛЕНИЕ С БЕТОНА

С. Брозиг<sup>1</sup>, В. Кърджиев<sup>2</sup>

*Ключови думи:* оразмеряване, огъване

*Научна област:* стоманобетон и стоманобетонни конструкции

### РЕЗЮМЕ

Принципът на работата на елементите с напругаща армировка без сцепление с бетона е същият като на тези с армировка, имаща сцепление с бетона. Натисковите напрежения в бетона вследствие на напругането противодействат на тези в опънатата зона на сечението и по този начин подобряват цялостната работа на елемента. Точното определяне на носимоспособността на елементи с напругаща армировка без сцепление с бетона е трудно. Причината е, че теорията на Бернули за равнинност на сеченията не е в сила и силата в напругаща армировка в крайно гранично състояние трябва да се определи като функция от деформираната схема на гредата.

Няма ясно дефинирани правила, които могат да се използват при изчисляването на този вид греди. Тази статия представя методики, използвани в различните нормативни документи за определяне на носимоспособността на елементи с напругаща армировка без сцепление с бетона, както и други подходи, базирани на експериментални резултати.

<sup>1</sup> Силвия Брозиг, доторант, кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: sbrozig@gmail.com

<sup>2</sup> Васил Кърджиев, доц. д-р инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: kardjiev@mail.bg

## 1. Въведение

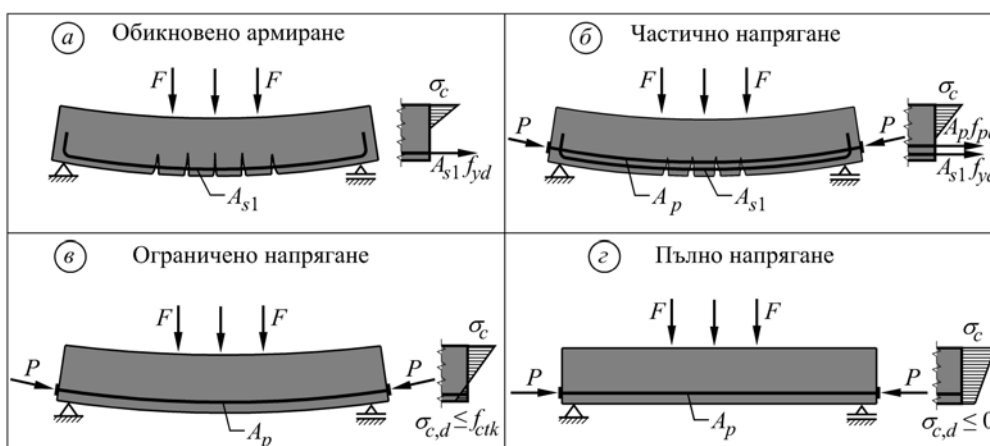
Целта от предварителното налягане на армивката е в експлоатационно състояние в сеченията на елемента да се установят само натискови наляжения по цялото сечение или натискови и малки опънни наляжения (без да се образуват пукнатини в опънната зона при всички видове натоварвания) или с допускане на ограничени пукнатини. В зависимост от степента на предварителното налягане разграничаваме различни налягнати и деформирани състояния на стоманобетонните елементи:

– липса на предварително налягане (обикновени стоманобетонни конструкции) – фиг. 1а. Образуването на пукнатините в бетона настъпва при наляжения в опънната армивка от порядъка на 30 МРa;

– частично налягане – фиг. 1б. При него, подобно на обикайно армираните елементи, имаме стадий II на налягнато и деформирано състояние, но с редуцирани пукнатини;

– ограничено налягане – фиг. 1в. При него наляженията в опънния ръб на бетона са по-малки или равни на характеристичната опънна якост на бетона. Евентуалните пукнатини, които е възможно да се образуват в елемента ще бъдат с ограничена широчина;

– пълно налягане – фиг. 1г.



Фиг. 1. Варианти за налягане на стоманобетонни елементи

В зависимост от момента на налягане по отношение на полагането на бетона различаваме следните два основни начина на работа: налягане преди бетониране (предаване на налягащата сила върху бетона чрез сцепление) и налягане след бетониране, като то може да бъде със сцепление или без сцепление. Предмет на статията е налягането без сцепление. Предимствата при него са възможността за донналягане и за оптимален избор на траектории на налягащата армивка. А с последователно налягане биха могли да се въвеждат и по-големи общи налягащи сили.

Недостатък са сложните закотвящи устройства и трудоемките операции като полагане на каналобразователи, самото налягане на армивката, закливането ѝ и евентуалното етапно налягане. В някои случаи налягащата армивка без сцепление

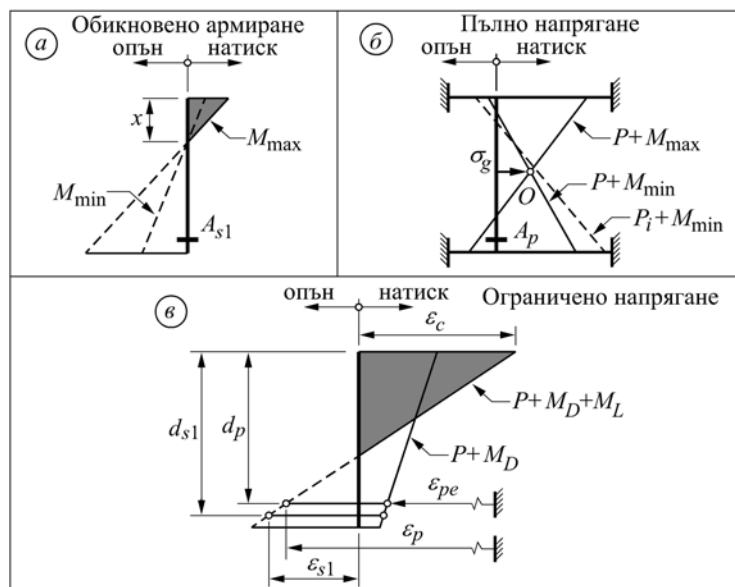
с бетона се поставя извън напречното сечение на елемента. Този начин на налягане се използва най-вече при усилване на съществуващи стоманобетонни елементи.

За налягаща армировка могат да бъдат използвани стандартни кабели или високоякостни стоманени пръти, поставени вътре или извън сечението.

При гредови елементи налягането е ефективно, ако налягащата армировка е максимално отдалечена от центъра на тежестта на сеченията, така наречения принцип на „обратното огъване“.

## 2. Поведение на предварително налягнати елементи, подложени на огъване

Обикновено стоманобетонните елементи, подложени на огъване, работят с пукнатини в опънатата зона, дори и само от действието на постоянните товарни въздействия. При пълно налягнатите елементи липсват пукнатини в опънатата зона и при пълно натоварване. Ограничено налягнатите елементи имат поведение между това на неналягнатите и на пълно налягнатите елементи.

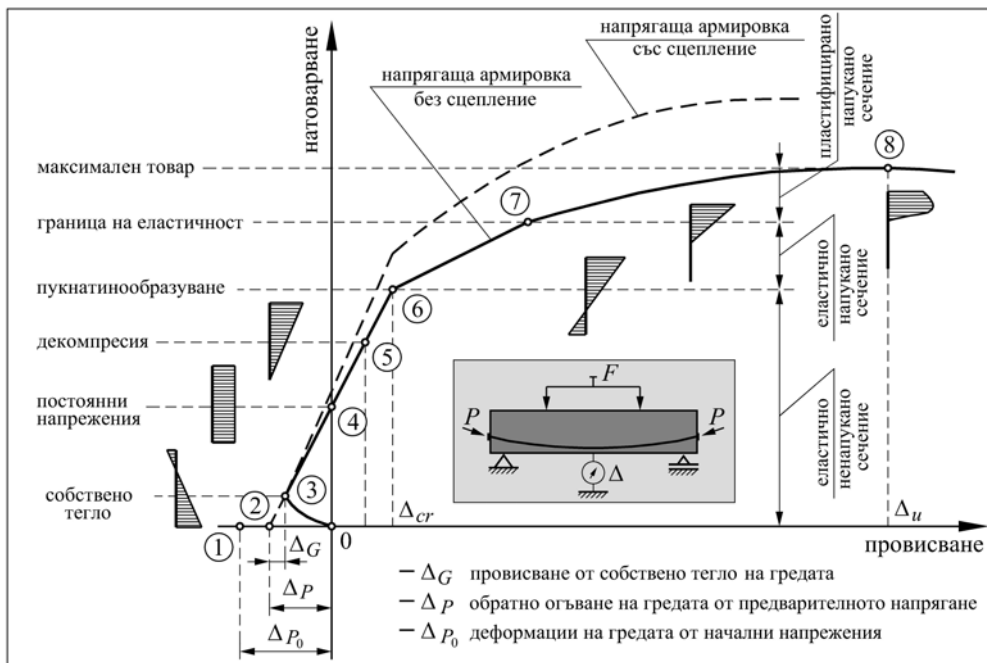


Фиг. 2. Сравнение на налягнатото и деформирано състояние на неналягнати, пълно и ограничено налягнати елементи, подложени на огъване

Обикновено ограничено налягнатите стоманобетонни гредови елементи се проектират, така че да работят без пукнатини при действието на постоянните товари и с пукнатини при пълното натоварване на гредата. В тези случаи се предполага линейно еластично поведение на елемента до прилагането на пълния товар. На фиг. 2 е показана типичната диаграма на наляженията или деформациите по височина на сечението при работа в линейната област за случаите на неналягнати, ограничено налягнати и пълно налягнати гредови елементи, подложени на огъване. Поведението е забележимо различно във всеки един от тези случаи. Може да се отбележи например, че

нулевата линия на напуканото напречно сечение съответства на точката с нулеви напрежения и зависи от големината на приложения огъващ момент. Така огъващият момент води до увеличаване на резултантните на вътрешните усилия в напречното сечение при спазване на условието  $F_c = A_{s1}f_{yd}$ , а рамото на двоицата остава константно – фиг. 2а.

В пълно напрегнати елементи (фиг. 2б) напречното сечение е ненапукано и нулевата линия, вследствие на огъването, съвпада с центъра на тежестта на ненапуканото сечение. Резултантната на усилията в натисквата зона  $F_c$  е равна на силата, вложена в предварително напрегнатата армировка  $P$ , т.е.  $F_c = P = A_p f_{pd}$ . Но за разлика от ненапрегнатото сечение, това предизвиква отместване на местоположението на равнодействащата на натисквите усилия  $F_c$ , което зависи от местоположението на силата в напрегната армировка  $P$  и това води до увеличаване на рамото между тези две сили. В ограничено напрегната греда (фиг. 2в) нулевата линия на напреженията се премества нагоре или надолу в сечението в зависимост от големината на действащия външен огъващ момент и дали сечението е напукано или не. В случая големината на вътрешните сили и рамото между тях може да варират значително с прилагането на външния огъващ момент ( $M_D$  от постоянни товари +  $M_L$  от временни товари въздействия).



Фиг. 3. Типична зависимост натоварване-провисване за предварително напрегната греда, подложена на огъване, с напрягаща армировка без и със сцепление

На фиг. 3 е показана зависимостта натоварване-провисване за една напрегната греда без сцепление на армировката с бетона. При наличие на сцепление между напрягащата армировка и бетона диаграмата е същата, но над тази без сцепление с бетона (дадена с пунктир линия на фиг. 3), като най-вероятно разрушението на елемента, в случай че напрягащата армировка е без сцепление с бетона, ще настъпи преди нейното

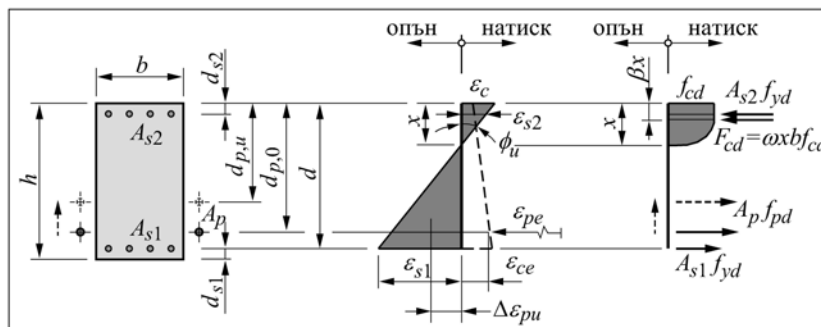
провлачване. Това е така, тъй като при отсъствие на сцепление на армировката с бето- на прирастът в напреженията в армировката от действието на ефектите от външното натоварване е еднакъв по цялата дължина на армировъчните пръти и той е значително по-малък от случая при наличие на сцепление с бетона и действащ пълен товар. Това обстоятелство променя характера на пукнатинообразуването на елемента и води до увеличаване на провисването и ширината на образувалите се пукнатини. Разруше- нието на такива елементи, като правило, настъпва при малки товари вследствие на изчерпване на носещата способност на бетона в натисковата зона, вследствие на което якостните свойства на напрягащата армировка много често не могат да бъдат пълно- ценно използвани.

#### 4. Определяне на носимоспособността на предварително напрегната греда, подложена на огъване

Носещата способност на една пълно предварително напрегната греда, с право- ъгълно напречно сечение, в крайно гранично състояние може да бъде определена с формулата – фиг. 4:

$$M_u = A_p f_{pd} (d_{pu} - \beta x) + A_{s1} f_{yd} (d - \beta x) - A_{s2} f_{yd} (d_{s2} - \beta x), \quad (1)$$

където  $\beta x$  е разстоянието до центъра на тежестта на натисковата зона на сечението в крайно гранично състояние.



Фиг. 4. Напрегнато и деформирано състояние на пълно напрегнат стоманобетонен елемент, с правоъгълно напречно сечение и напрягаща армировка без сцепление с бетона, подложен на огъване

Следователно за да се оцени работата на такъв елемент в крайно гранично състояние, е необходимо да се определи реалното напрежение в напрягащата армировка  $f_{pd}$ .

#### 5. Определяне на реалното напрежение в напрегнатата без сцепление с бетона армировка

При определянето на напреженията в напрягащата армировка без сцепление с бетона или в прираста на тези напрежения в крайни гранични състояния има различни подходи и голямо разнообразие.

Най-консервативният резултат се получава в случая, когато в напрегащите пръти изобщо не се отчита увеличението на напреженията за крайно гранично състояние и силата в тях се определи чрез зависимостта

$$P_{m,\infty} = \sigma_{pm,\infty} A_p, \quad (2)$$

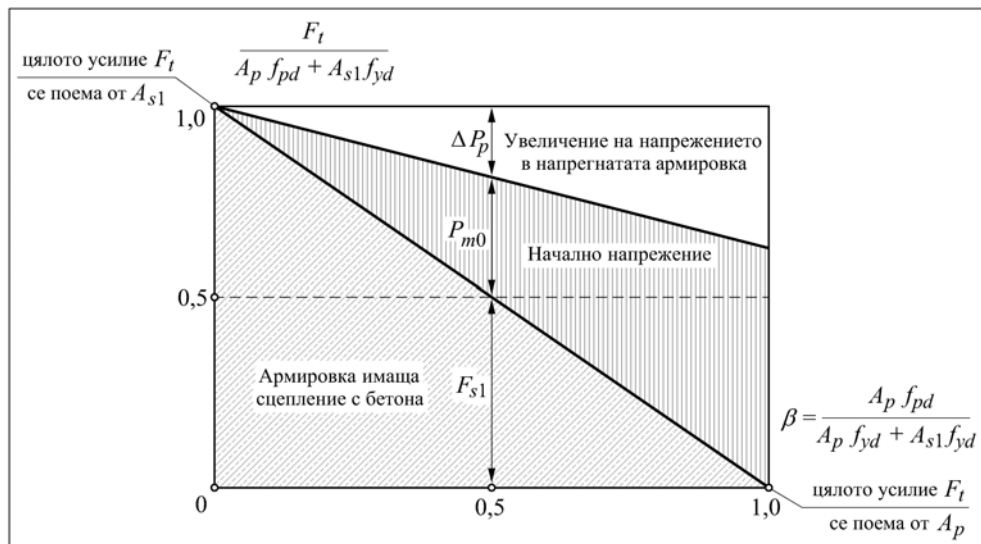
където  $\sigma_{pm,\infty}$  е напрежението в напрегащата армировка без сцепление с бетона, след отчитане на всички загуби в предварително напрегане;

$A_p$  е площта на напречното сечение на напрегащата армировка.

При използването на такъв подход не се дооценява действащото гранично натоварване и се получава значително по-голяма площ на напречно сечение на армировката от необходимата.

Определянето на реалните или близки до тях напрежения в напрегащите пръти въз основа на относителните деформации на конструктивния елемент позволява да се извършат по-точни оразмерителни проверки и да се заложи по-малко консервативно количество напрегаща армировка. Това е особено важно в случаите, когато в разглеждания елемент основното количество армировка има сцепление с бетон и когато първоначалните напрежения в напрегащите пръти са близки до условната граница на провлачване.

Това може да бъде илюстрирано с представената диаграма на фиг. 5 [5]. На вертикалната ос на графиката е показано отношението на сумарното усилие в опънатата зона на конструктивен елемент, подложен на огъване, към сумата от равнодействащата на усилията в обикновената армировка, която е със сцепление с бетона и в напрегащата армировка без сцепление с бетона. На хоризонталната ос на графиката – отношението на усилието, поемано от напрегащата армировка без сцепление с бетона към сумата от равнодействащата на усилията в обикновената и напрегащата армировка.



Фиг. 5. Зависимост на относителното усилие в опънатата зона от частта, поемана от напрегащата армировка

Усилието в опънатата зона на напрегнатия елемент в гранично състояние  $F_t$ , включва три компонента: силата, съответстваща на достигане на границата на провлачване за обикновената ненапрегната армировка  $F_{s1}$ , началната сила  $P_{m0}$  в напрегащата армировка без сцепление с бетона и увеличението на силата  $\Delta P_p$ , причинено от удължението на напрегащата армировка от действащите външни товари.

Както се вижда и от фигурата, точността в определянето на деформациите на конструктивния елемент, чрез които впоследствие се определя и удължението в напрегната армировка без сцепление с бетона, има особено значение за елементи с малко количество обикновена армировка. И обратно, за конструктивни елементи, в които основното количество е на напрегната армировка, то дори неточното определяне на  $\Delta \epsilon_p$  може да обезпечи достатъчно точни гранични усилия и количество на напрегащата армировка  $A_p$ .

Окончателната стойност на напреженията в напрегащата армировка се получава като към напрежението в армировката се добави и това, вследствие на удължението ѝ:

$$f_{pd} = \sigma_{pm,\infty} + \Delta f_{pd} \quad (3)$$

Практически всичките проведени изследвания, дадени в техническата литература, са свързани с определяне на стойността на напрежението  $\Delta f_{pd}$  в напрегащата армировка без сцепление с бетона в крайно гранично състояние. Въз основа на тези изследвания са дадени и съответните методики, дадени в различните нормативни документи.

### 5.1. Еврокод 2 [1]

Съгласно Еврокод 2 за елементи с напрегаща армировка, която постоянно е без сцепление с бетона, когато се изчислява увеличението на напрежението в напрегащата армировка, обикновено е необходимо да се вземе под внимание деформирането на целия елемент. При липса на подробно изчисление може да се приеме, че увеличаването на напрежението в крайното гранично състояние е  $\Delta \sigma_{P,ULS}$ , като неговата стойност съгласно БДС EN1992-1-1/NA е 100 МПа, което е и препоръчителната стойност на Еврокод 2. Това е доста консервативно приемане, но е в полза на сигурността. Трябва да се обърне по-специално внимание в случаите, когато напрегащият момент не следва моментовата диаграма или армировката минава през натисквата зона на бетона или ако има малък ексцентрицитет между центъра на тежестта на бетоновото сечение и този на напрегнатата армировка. Тогава при прираст от порядъка на 100 МПа може да се надвиши условната граница на провлачване.

### 5.2. Американските норми АСІ 318-14 [2]

В американските норми са дадени формули за директно определяне на реалните напрежения в напрегащата армировка, която е без сцепление с бетона, които са в зависимост от отношението на отвора на гредата към нейната полезна височина  $l_n/h$ . При греди с отношение  $l_n/h \leq 35$  напрежението в МПа за напрегащата армировка без сцепление с бетона, се приема:

$$f_{pd} \leq \begin{cases} f_{se} + 70 + f'_c / (100\rho_p) \\ f_{se} + 420 \\ f_{py} \end{cases} \quad (4)$$

А при  $l_n/h > 35$ :

$$f_{pd} \leq \begin{cases} f_{se} + 70 + f'_c / (300\rho_p) \\ f_{se} + 210 \\ f_{py} \end{cases} \quad (5)$$

където  $f'_c$  е якостта на натиск на бетона;

$f_{py}$  е якостта при достигане на условната граница на провлачване;

$\rho_p$  е отношението на площта на напрегнатата армировка към разстоянието между най-натиснатата точка на елемента и центъра на тежестта на напрягащата армировка.

Очевидно е, че уравнения (4) и (5), предлагани от АСІ, могат да обезпечат прираст в напреженията за крайно гранично състояние в границите от 70 до 420 МРа, което може да се счита както и като опасен, така и като консервативен резултат в сравнение с европейските норми.

### 5.3. Руската нормативна база [4]

В „Пособия по проектированию железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном” (към СНиП 2.03.01.84), разработено под ръководството на А. И. Мордич, е дадена формула за определяне на граничното напрежение в напрягащата армировка без сцепление с бетона за гредови елементи, подложени на едноосово огъване, която е във функцията на височината на натисковата зона  $x$ :

$$f_{pd} = \sigma_{pm,\infty} + 3,5\alpha f_{ctd} + \beta f_{cd} x / (100\rho_e) \leq f_{pd} \quad (6)$$

където  $f_{ctd}$  е изчислителната якост на опън на бетона;

$f_{cd}$  е изчислителната якост на натиск на бетона;

$\rho_e$  е коефициентът на армиране.

В специализираната техническа литература има и други формули, базирани на проведените от авторите експериментални изследвания, които отчитат различни фактори, влияещи на големината на напреженията в напрягащата без сцепление с бетона армировка. Някои от тези фактори са:

- отношение на отвор към полезна височина с отчитане типа на натоварването;
- местоположение на нулевата линия на сечението;
- коефициентът на армиране за обикновената армировка, която има сцепление с бетона;

- коефициентът на армиране за напрягащата армировка, която е без сцепление с бетона;
- отношението на деформациите на армировката със сцепление към тези на армировката без сцепление с бетона;
- дължината на пластичната става, която се проявява в етапа: от провлачване на ненапрегнатата армировка до разрушаване на бетона в критичното сечение;
- ексцентрицитетът на напрягащата армировка;
- влиянието на ефектите от втори ред при деформирането на елемента;
- разстоянието между отклоняващите приспособления (девиаторите) на напрягащата армировка;
- стойността на максималното провисване.

## 6. Заключение

В заключение е необходимо да се отбележи, че всички методики са свързани в голяма или малка степен с условности, не отчитайки в пълна степен особеностите на деформирането на елементите с напрягаща армировка, която няма сцепление с бетона. Точното определяне на реалното напрежение в тази армировка е един от най-важните проблеми при определяне на носещата способност на тези елементи. Също така може да се отбележи, че от голямо значение е и коефициентът на армиране на обикновената армировка, която е в сцепление с бетона. За съжаление обаче се наблюдава ограничено количество както опитни изследвания, така и предложения по изчисляването на конструкции със смесено армиране, при които част от армировката има сцепление с бетона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1992 Еврокод 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради. Български Институт по стандартизация, 2007.
2. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2014.
3. *Димитров, Д.* Проектиране на предварително напрегнати стоманобетонни конструкции съгласно EC2, КИИП, 2013.
4. *Мордич, А. И.* Пособия по проектированию железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном (к СНиП 2.03.01.84).
5. *Пецольд, Т. М., С. А. Тур.* Прогнозиране на предельного состояния в предварительно напряженных конструкциях с напрягаемой арматурой, не имеющей сцепления с бетоном, Вестник Брестского государственного технического университета, 2011, № 1.
6. *Naaman, A. E., F. M. Alkhairi.* Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons, ACI STRUCTURAL JOURNAL V. 88, No. S, September-October 1991.

7. Harajli, M. H. Strengthening of concrete beams by external prestressing, PCI JOURNAL November-December 1993.

8. Macovei-Benczur, S., D. M. Rogowsky. Developments in external post-tensioning.

9. Senthil, R., R. Manisekar. Ultimate flexural behavior of externally prestressed new beams and distressed beams, Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 10, No. 4, April 2015.

10. Gauvreau, D.P., Ultimate Limit State of Concrete Girders Prestressed with Unbonded Tendons, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich Bericht Nr. 198, Januar 1993.

## **SPECIFICITIES IN EVALUATING THE BEARING CAPACITY OF BEAMS WITH UNBONDED TENDONS**

**S. Brozig<sup>1</sup>, V. Kardjiev<sup>2</sup>**

*Keywords: design, bending*

*Research area: reinforced concrete and reinforced concrete structures*

### **ABSTRACT**

The principle of external post-tensioning is the same as that of pre-stressing, i.e., pre-stressing the concrete produces stresses, which will counteract tensile stresses induced by external loadings, resulting in increased overall capacity of the element. Precise evaluation of the bearing capacity of beams with unbonded tendons, either internal or external, is difficult. The reason is that the plane sections assumption is no longer valid when unbonded steel is used. The force in pre-stressing steel corresponding to ultimate limit state must be computed from deformations in the entire structure and is a function of the overall behaviour of the beam.

There are no conventional guidelines available on this method of strengthening. This paper presents the various methods of determining the capacity of externally pre-stressed beams which are used in the codes and others based on different laboratory results.

---

<sup>1</sup> Silvia Brozig, PhD student, Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: sbrozig@gmail.com

<sup>2</sup> Vasil Kardjiev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: kardjiev@mail.bg