

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.

## НОСИМОСПОСОБНОСТ ПРИ РАВНИНЕН НЕЦЕНТРИЧЕН НАТИСК НА ИЗЦЯЛО ВБЕТОНИРАНИ СТОМАНЕНИ СЕЧЕНИЯ НА КОМБИНИРАНИ КОЛОНИ, ИЗГОТВЕНИ ОТ РАЗЛИЧНИ КЛАСОВЕ БЕТОН

Ц. Колев<sup>1</sup>

*Ключови думи:* комбинирани стомано-стоманобетонни колони, равнинен нецентричен натиск

*Научна област:* стоманобетон и стоманобетонни конструкции

### РЕЗЮМЕ

В настоящата статия е разгледан метод за определяне на носимоспособността на напречните сечения на комбинирани стомано-стоманобетонни колони с изцяло вбетонирано стоманено сечение, подложени на равнинен нецентричен натиск. Разгледани са правоъгълни напречни сечения на комбинирани стомано-стоманобетонни колони, изготвени от армировъчна стомана клас B500, конструкционна стомана клас S275 и различни класове бетон. За работни диаграми на бетона са приети: правоъгълната и билинейната диаграма от Еврокод 2 и правоъгълната диаграма, разпростираща се до нулевата линия, регламентирана в Еврокод 4. Направени са изводи въз основа на получените резултати за напречните сечения на колоните при различните класове бетон и при различните приети работни диаграми на бетона. Целта на статията е чрез представения метод да се разшири обхватът на приложение на Еврокод 4.

### 1. Въведение

През последните десетилетия прилагането на комбинирани стомано-стоманобетонни колони в световната строителна практика все повече се разширява. Комби-

---

<sup>1</sup> Цанко Колев, инж., докторант, кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Христо Смирненски” № 1, София 1046, e-mail: outlook@abv.bg

нираните колони с изцяло вбетонирани стоманени сечения се характеризират с повишена носимоспособност на напречните сечения в сравнение със стоманобетонните колони, намален риск от загуба на устойчивост в сравнение със стоманените колони, повишена коравина, повишена огнеустойчивост, повишена деформируемост, дуктилност и повишено количество дисипирана енергия при сеизмични въздействия. Те представляват едно икономично решение по отношение на разходите за материали при тежко натоварени конструкции.

В обхвата на БДС EN 1994-1-1:2005 – Еврокод 4 [2] са включени само комбинирани колони от обикновен бетон (с нормална якост) с класове по якост на натиск от C20/25 до C50/60 включително и конструкционна стомана с класове от S235 до S460. Еврокод 4 не разглежда проектирането на стомано-стоманобетонни колони от високоякостен бетон. Причините са, че приетите в евростандарта предпоставки за изчисляване на комбинирани колони не позволяват да се отчете изменението на характеристиките на бетона при прехода от обикновени към високоякостни бетони, както и недостатъчният брой теоретични и експериментални изследвания на комбинирани стомано-стоманобетонни колони, изпълнени с високоякостен бетон.

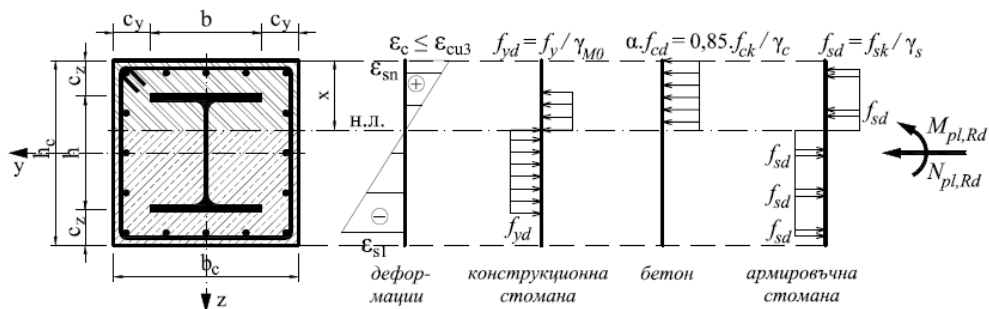
Прилагането на високоякостни бетони в комбинирани стомано-стоманобетонни колони води до още по-голямо увеличаване на носимоспособността на напречните сечения на колоните, до увеличаване на коравината им, до значително редуциране на размерите на напречните сечения на колоните, в сравнение с използването на бетони с нормална якост. В резултат намаляването на размерите на колоните води до получаване на по-големи свободни пространства, олекотяване на конструкциите, реализиране на икономия на материали, средства и труд при тяхното изготвяне, транспорт и монтаж.

В настоящата статия е представен метод за изчисляване на носимоспособността на напречните сечения на комбинирани стомано-стоманобетонни колони с изцяло вбетонирани стоманени сечения, изготвени от високоякостен бетон, подложени на равнинен нецентричен натиск (натиск, комбиниран с просто огъване). Този метод се основава на опростения изчислителен метод, регламентиран в БДС EN 1994-1-1:2005 [2], и чрез него се цели да се разшири обхватът на приложение на Еврокод 4 [2]. Той отчита изменението на характеристиките на бетона при прехода от обикновени към високоякостни бетони, отразени в БДС EN 1992-1-1:2005 – Еврокод 2 [1] – използвани са аналитичните изрази за описване на работните диаграми на бетона при натоварване на натиск.

## **2. Носимоспособност на напречни сечения на стомано-стоманобетонни колони, подложени на равнинен нецентричен натиск съгласно БДС EN 1994-1-1:2005 [2]**

Съгласно БДС EN 1994-1-1:2005 [2] носимоспособността на комбинирани стомано-стоманобетонни колони, подложени на равнинен нецентричен натиск (натиск, комбиниран с просто огъване), по опростения изчислителен метод се определя при използване на правоъгълни диаграми на напреженията, като за опростяване диаграмата в натисквата зона на бетона се простира до нулевата линия (фиг. 1). Това не е в полза на сигурността, особено за високоякостни бетони, чиято работна диаграма на натиск е близка до триъгълната [3].

Коефициентът  $\alpha$  на фиг. 1 отчита влиянието на продължителното натоварване върху якостта на натиск на бетона и има стойност  $\alpha = 0,85$  за бетон в колони с изцяло или частично вбетонирани стоманени сечения [2].



Фиг. 1. Разпределение на напреженията в бетона, конструкционната и армировъчната стомана в пластичен стадий при нецентричен натиск

Носимоспособността на стомано-стоманобетонно напречно сечение на нецентричен натиск (натиск, комбиниран с просто огъване), се изразява с кривата на взаимодействие от фиг. 2. В Еврокод 4 се допуска за опростяване и в полза на сигурността кривата на взаимодействие да се замени с полигонална диаграма (пунктирната диаграма BDCA на фиг. 2) [2]. Кривата на взаимодействие се изчертава чрез разглеждане на различни положения на нулевата линия в напречното сечение и определяне на носимоспособността на напречното сечение в зависимост от разпределението на напреженията в бетона, конструкционната стомана и армировката.



Фиг. 2. Определяне на носимоспособността на огъване  $M_{N,Rd,i}$  при правоъгълна или билинейна работна диаграма на бетона съгласно БДС EN 1992-1-1:2005 [1] и на носимоспособността на огъване  $M_{pl,N,Rd,i}$  в пластичен стадий съгласно БДС EN 1994-1-1:2005 [2]

### 3. Носимоспособност на комбинирани стомано-стоманобетонни колони съгласно БДС EN 1994-1-1:2005 [2]

Комбинирана стомано-стоманобетонна колона от обикновен бетон (бетон с нормална якост) с клас от C20/25 до C50/60 включително, подложена на нецентричен на-

тиск, има достатъчна носимоспособност (фиг. 2), ако изчислителната нормална сила  $N_{Ed}$  и изчислителният огъващ момент  $M_{Ed}$  удовлетворяват условията [2]:

$$N_{Ed} \leq \chi \cdot N_{p\ell,Rd}, \quad (1)$$

$$M_{Ed} \leq \alpha_M \cdot M_{p\ell,N,Rd} = \alpha_M \cdot \mu_d \cdot M_{p\ell,Rd}, \quad (2)$$

където  $N_{p\ell,Rd}$  е изчислителната носимоспособност на централен натиск на комбинираното напречно сечение в пластичен стадий;

$\chi$  – коефициент на изкълчване за разглежданата равнина, чрез който се вземат предвид влиянията от втори ред и несъвършенствата на елемента;  $\chi = \min(\chi_y; \chi_z)$ ;

$M_{Ed}$  – по-големият от огъващите моменти в краищата на колоната и максималният огъващ момент по дължината ѝ, изчислен с отчитане при необходимост на несъвършенствата на елемента и влиянията от втори ред;

$M_{p\ell,N,Rd}$  – носимоспособност на огъване на комбинираното напречно сечение в пластичен стадий при действие на нормалната натискова сила  $N_{Ed}$  (фиг. 2);

$M_{p\ell,Rd}$  – носимоспособност на чисто огъване на комбинираното напречно сечение, в пластичен стадий (фиг. 2);

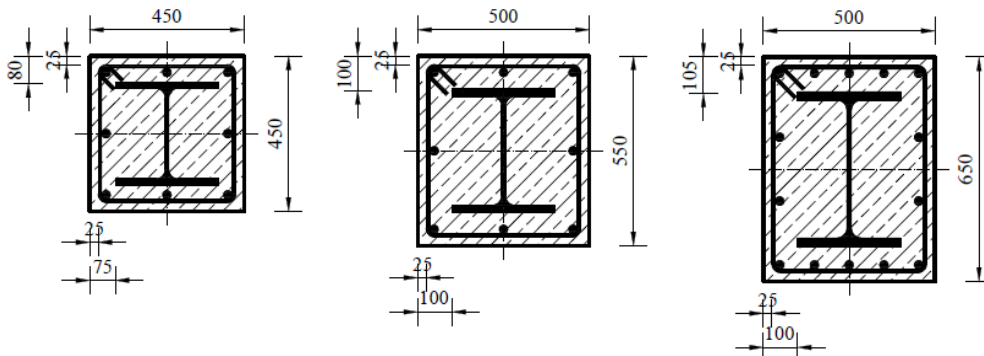
$\mu_d = M_{p\ell,N,Rd} / M_{p\ell,Rd}$  – коефициент, който определя носимоспособността на огъване на колоната при действие на нормална сила  $N_{Ed}$ .

Коефициентът  $\alpha_M$  се приема равен на 0,9 за стомани класове от S235 до S355 включително и 0,8 за стомани класове S420 и S460. Този коефициент отчита факта, че при изчисляване на комбинирани колони в пластичен стадий действителните работни диаграми на бетона и стоманата се заменят с правоъгълни диаграми на напреженията, което довежда до надценяване на носимоспособността на комбинираните напречни сечения на огъване [3].

Този изчислителен метод на Еврокод 4 [2] е неприложим при проектиране на стомано-стоманобетонни колони от високоякостен бетон, защото не отчита изменението на характеристиките на бетона при прехода от обикновени към високоякостни бетони. Прилагането на високоякостни бетони в комбинирани колони е възможно само ако в изчисленията се вземат предвид особеностите им, отразени в БДС EN 1992-1-1:2005 [1], например чрез използване на изчислителните работни диаграми на бетона, дадени в Еврокод 2 [1].

#### 4. Аналитично определяне на стойностите на коефициента $\alpha_M$ за различни класове бетон

За определяне на стойностите на коефициента  $\alpha_M$  са използвани три вида напречни сечения на комбинирани колони с изцяло вбетонирано стоманено сечение, с размери: 45/45 cm, 50/55 cm, 50/65 cm – фиг. 3. При конструирането на сеченията са спазени изискванията за минимално  $c_{\min,y(z)}$  и максимално бетонно покритие  $c_{\max,y(z)}$  на конструкционната стомана ( $c_y \leq 0,4 \cdot b$ , [mm] и  $c_z \leq 0,3 \cdot h$ , [mm]) – фиг. 1. Характеристиките на напречните сечения са представени в таблица 1.

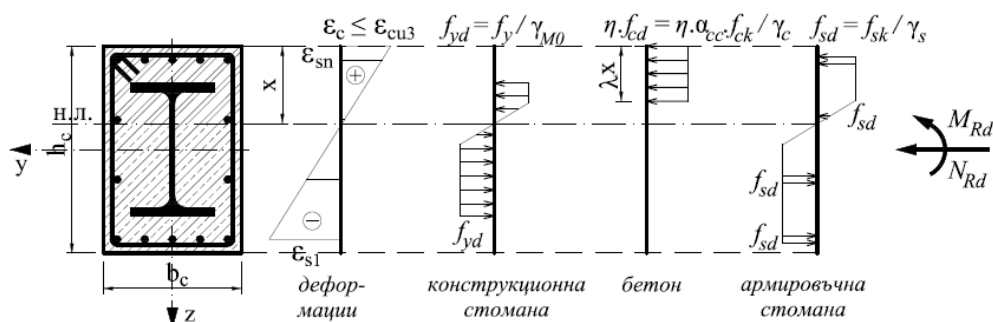


Фиг. 3. Видове напречни сечения

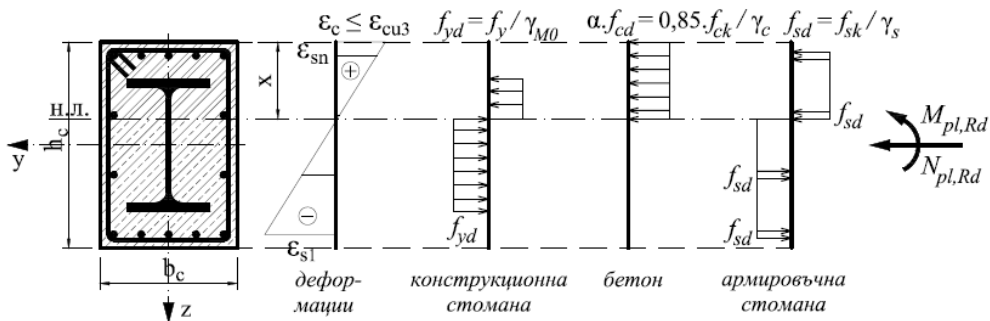
Използвани са класове бетон C20/25, C25/30, C50/60, C55/67, C60/75, C70/85, C80/95 и C90/105, армировъчна стомана клас B500 и конструкционна стомана клас S275. За определяне на носимоспособността на напречните сечения на комбинираните колони са използвани правоъгълната (фиг. 4) и билинейната работна диаграма на бетона (фиг. 6) от Еврокод 2 [1] и правоъгълната работна диаграма на бетона, разпростираща се до нулевата линия (фиг. 5), регламентирана в Еврокод 4 [2]. Приети са идеализирани работни диаграми „напрежения-деформации“ на армировъчната и конструкционната стомана с хоризонтален горен клон. Изчислителната стойност на модула на еластичност на армировъчната стомана  $E_s$  се приема 200 000 МПа, а на конструкционната  $E_a$  се приема 210 000 МПа. На фиг. 2 е показано съотношението между кривата на взаимодействие в пластичен стадий (БДС EN 1994-1-1:2005 – Еврокод 4 [2]) и кривите на взаимодействие при правоъгълна или билинейна работна диаграма на бетона и идеализирани работни диаграми на конструкционната и армировъчната стомана, регламентирана в Еврокод 2 [1].

Таблица 1. Характеристики на напречните сечения

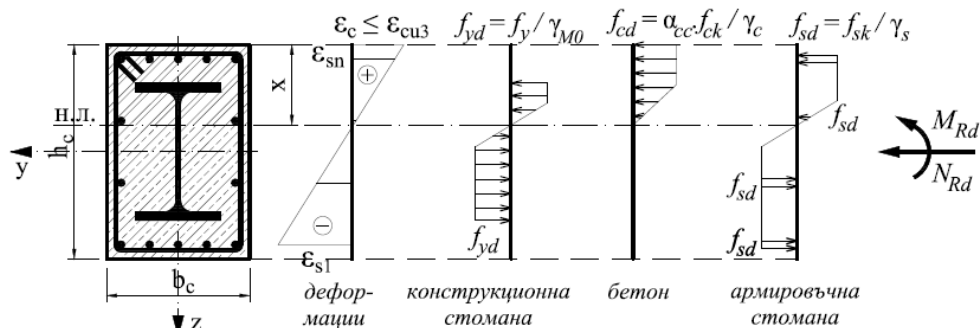
№	Напречно сечение			Стоманен профил		Надлъжна армировка			
	$b_c$ (mm)	$h_c$ (mm)	$A$ (cm <sup>2</sup> )	-	$A_a$ (cm <sup>2</sup> )	$n_s$	$\phi_s$ (mm)	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	$\rho_s$ (%)
1	450	450	2025	HEB 300	149	8	25	39.272	2.138
2	500	550	2750	HEB 360	181	8	25	39.272	1.552
3	500	650	3250	HEB 450	218	14	25	68.726	1.312



Фиг. 4. Правоъгълна работна диаграма на бетона и идеализирани работни диаграми на конструкционната и армировъчната стомана – Еврокод 2 [1]



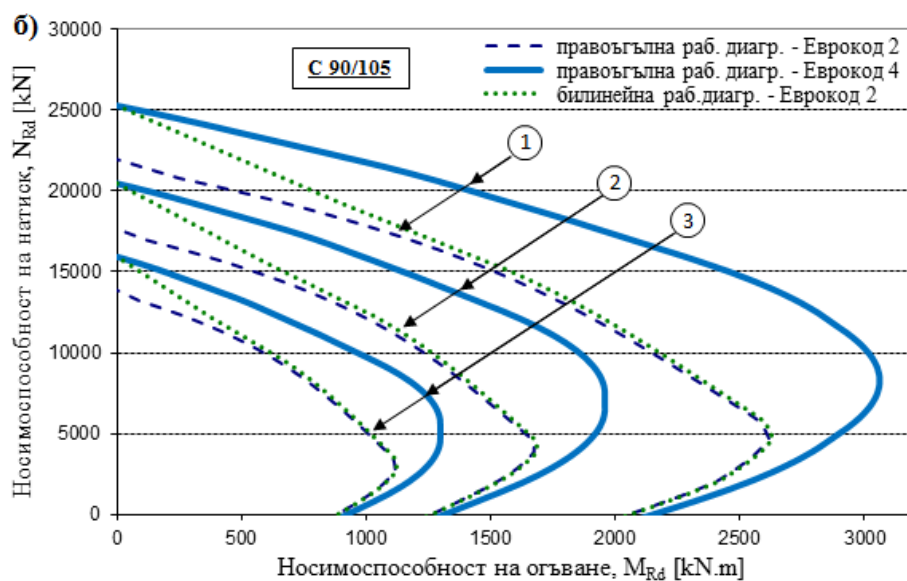
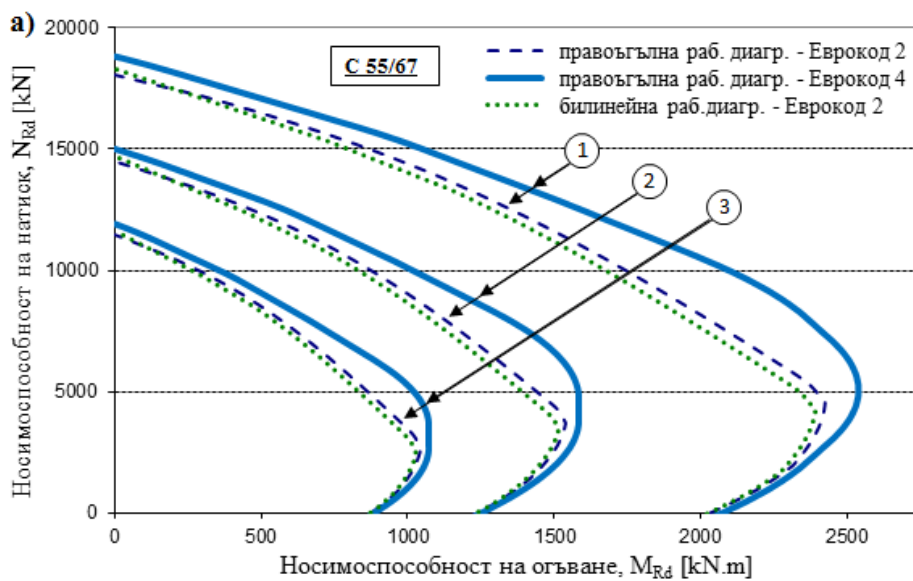
Фиг. 5. Правоъгълна работна диаграма на бетона от натиснатия ръб на сечението до нулевата линия и правоъгълни работни диаграми на конструкционната и армировъчната стомана (работа в пластичен стадий – Еврокод 4 [2])



Фиг. 6. Билинейна работна диаграма на бетона и идеализирани работни диаграми на конструкционната и армировъчната стомана – Еврокод 2 [1]

При използване на правоъгълната и билинейната работна диаграма на бетона от Еврокод 2 стойността на коефициента  $\alpha_{cc}$ , отчитащ дълговременните ефекти върху якостта на натиск на бетона и неблагоприятните ефекти, породени от начина на прилагане на натоварването, е приета 0,85 съгласно БДС EN 1992-1-1:2005/NA [1].

От кривите на взаимодействие на фиг. 7а и 7б се вижда, че максималната носимоспособност на центричен натиск  $N_{Rd}$  за класове бетон C55/67 и C90/105 се получава в пластичен стадий (това се наблюдава и при останалите разглеждани класове бетон, чиито криви на взаимодействие на са показани в настоящата статия). Основната причина за това е, че при използване на правоъгълната и билинейната работна диаграма на бетона и идеализираните работни диаграми на конструкционната и армировъчната стомана за класове бетон от C20/25 до C70/85 включително не може да се достигне изчислителната стойност на границата на провлачване  $f_{sd}$  на армировъчната стомана. Това се дължи на факта, че съгласно правилото на „трите точки“, дефинирано в БДС EN 1992-1-1:2005 [1], при центричен натиск деформациите на натиснатия бетон в цялото напречното сечение на колоната достигат стойността  $\epsilon_{c3}$ , по-малка от стойността на деформацията на армировъчната стомана  $\epsilon_{s,yd} = f_{sd} / E_s$ , при която се достига изчислителната стойност на границата ѝ на провлачване  $f_{sd}$ . В резултат при центричен натиск армировъчната стомана работи с напрежения  $\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_{c3}$ , по-малки от изчислителната стойност на границата ѝ на провлачване  $f_{sd}$ . От тук може да се направи изводът, че при тези класове бетон няма пълноценно използване на армировката.



1) напречно сечение 65/50 см; 2) напречно сечение 55/50 см; 3) напречно сечение 45/45 см

**Фиг. 7 а, б.** Сравнение на кривите на взаимодействие на три вида напречни сечения на комбинирани колони при различни работни диаграми на бетона и различни класове бетон

При класове бетон C80/95 и C90/105 се достига изчислителната стойност на границата на провлачване  $f_{sd}$  на армировъчната стомана, защото деформациите на натиснатия бетон при центричен натиск имат стойност  $\epsilon_{c3}$ , по-голяма от стойността на деформацията на армировъчната стомана  $\epsilon_{s,yd}$ , при която се достига границата на провлачване. В резултат носимоспособността на центричен натиск  $N_{Rd}$  на напречните сечения при използване на билинейната работна диаграма от Еврокод 2 [1] и правоъгълната работна диаграма от Еврокод 4 [2] са равни.

При класове бетон от C55/67 до C90/105 носимоспособността на централен натиск  $N_{Rd}$  при използване на правоъгълната работна диаграма, регламентирана в БДС EN 1992-1-1:2005 [1], е по-малка от носимоспособността на централен натиск при използване на билинейната работна диаграма на бетона. Това се дължи на факта, че при използване на правоъгълната работна диаграма на бетона от Еврокод 2 [1] стойността на изчислителната якост на натиск на бетона  $f_{cd}$  се умножава с коефициента  $\eta$ , който има стойности по-малки от 1 за класове бетон над C50/60.

Коефициентът  $\alpha_M$  се получава като средноаритметична стойност от стойностите на коефициентите  $\alpha_{M,j}$  за трите напречни сечения. От своя страна коефициентите  $\alpha_{M,j}$  се получават като средноаритметична стойност от стойностите на коефициентите  $\alpha_{M,i}$ . Всеки коефициент  $\alpha_{M,i}$  представлява отношението на носимоспособността на огъване  $M_{N,Rd,i}$ , получена от кривата на взаимодействие при правоъгълна или билинейна работна диаграма на бетона и идеализирани работни диаграми на конструкционната и армировъчната стомана, към носимоспособността на огъване  $M_{pl,N,Rd,i}$  в пластичен стадий, получена от кривата на взаимодействие съгласно Еврокод 4 [2]. Стойностите на  $M_{N,Rd,i}$  и  $M_{pl,N,Rd,i}$  са отчетени от кривите на взаимодействие чрез използване на стойности на носимоспособността на натиск  $N_{Rd,i}$  през стъпка 100 kN, както е показано на фиг. 2. Стойността на коефициента  $\alpha_M$  се получава по формулата:

$$\alpha_M = \frac{\sum_{j=1}^N \alpha_{M,j}}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{M,i}}{n} \right]}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \frac{M_{N,Rd,i}}{M_{pl,N,Rd,i}}}{n} \right]}{N}, \quad (3)$$

$$\alpha_{M,j} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{M,i}}{n}, \quad \alpha_{M,i} = \frac{M_{N,Rd,i}}{M_{pl,N,Rd,i}}, \quad (4)$$

където  $N = 3$  е броят напречни сечения;

$n$  – броят ординати от кривата на взаимодействие през стъпка 100 kN – фиг. 2.

От таблица 2 се вижда, че получените стойности на коефициента  $\alpha_M$  спрямо правоъгълната и билинейната работна диаграма на бетона, дефинирани в Еврокод 2 [1], при класове бетон от C20/25 до C50/60 включително и клас конструкционна стомана S275 са по-малки от стойността на коефициента  $\alpha_M = 0,9$ , регламентирана в Еврокод 4 [2]. Стойностите на коефициентите са близки до стойността на дефинирания в БДС EN 1994-1-1:2005 [2] коефициент, от което може да се направи изводът, че използваният метод е верен.

Въпреки че стойностите на коефициента  $\alpha_M$ , получени чрез използване на правоъгълната работна диаграма на бетона, дефинирана в Еврокод 2 [1], са по-близки до стойността на коефициента, дефиниран в Еврокод 4 [2], то стойностите, получени при използване на билинейната работна диаграма, са по-малки и в резултат е в полза на сигурността да се използват тези по-малки стойности.

От таблица 2 се вижда, че стойностите на коефициента  $\alpha_M$  при класове бетон от C55/67 до C90/105 намаляват с нарастването на класа на бетона. Те могат да се приемат както следва: за класове бетон от C20/25 до C50/60,  $\alpha_M = 0,85$ ; за класове бетон C55/67 и C60/75,  $\alpha_M = 0,8$ ; за клас бетон C70/85,  $\alpha_M = 0,76$ ; за класове бетон C80/95 и C90/105,  $\alpha_M = 0,7$ .

Таблица 2. Стойности на коефициентите  $\alpha_M$

Вид работна диаграма на бетона	Размери	45/45	50/55	50/65	усреднена стойност
	Клас констр. ст.	S275	S275	S275	
	Клас бетон	$\alpha_{M,1}$	$\alpha_{M,2}$	$\alpha_{M,3}$	
правоъгълна	C20/25	0.879	0.877	0.880	0.88
<b>билинейна</b>		0.850	0.844	0.847	<b>0.85</b>
правоъгълна	C25/30	0.881	0.880	0.879	0.88
<b>билинейна</b>		0.847	0.843	0.842	<b>0.84</b>
правоъгълна	C50/60	0.894	0.908	0.899	0.90
<b>билинейна</b>		0.845	0.857	0.846	<b>0.85</b>
правоъгълна	C55/67	0.858	0.858	0.857	0.86
<b>билинейна</b>		0.815	0.819	0.814	<b>0.82</b>
правоъгълна	C60/75	0.822	0.818	0.820	0.82
<b>билинейна</b>		0.796	0.798	0.793	<b>0.80</b>
правоъгълна	C70/85	0.764	0.768	0.766	0.77
<b>билинейна</b>		0.761	0.764	0.762	<b>0.76</b>
правоъгълна	C80/95	0.712	0.721	0.714	0.72
<b>билинейна</b>		0.725	0.725	0.724	<b>0.72</b>
правоъгълна	C90/105	0.678	0.685	0.679	0.68
<b>билинейна</b>		0.703	0.705	0.705	<b>0.70</b>

## 5. Заключение

Комбинираните стомано-стоманобетонни колони от високоякостен бетон са ефективни за промишлени, обществени и многоетажни жилищни сгради, както и в мостовото строителство. БДС EN 1994-1-1:2005 – Еврокод 4 [2] обаче не разглежда проектирането на комбинирани колони от високоякостен бетон с класове по якост на натиск над C50/60.

В настоящата статия е разгледан метод, чрез който да се вземат предвид особеностите на високоякостните бетони при определяне на носимоспособността на напречните сечения на комбинирани колони, чрез прилагане на изчислителните работни диаграми на бетона, регламентирани в БДС EN 1992-1-1:2005 – Еврокод 2 [1].

Резултатите от анализа показват, че представеният метод може да се използва за изчисляване на носимоспособността на напречните сечения на комбинирани колони с изцяло вбетонирани стоманени сечения, изпълнени с високоякостен бетон. Получените стойности на коефициента  $\alpha_M$  могат да се използват за разглежданите напречни сечения. За други видове напречни сечения са необходими допълнителни изследвания чрез по-горе изложения метод.

Включването на високоякостните бетони за изготвяне на комбинирани стомано-стоманобетонни колони с изцяло вбетонирани стоманени сечения в обхвата на БДС EN 1994-1-1:2005 – Еврокод 4 би разширило приложението на тези колони в строителството на сгради и инженерни съоръжения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1992-1-1:2005 и БДС EN 1992-1-1:2005/NA – Еврокод 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради.

2. БДС EN 1994-1-1:2005 и БДС EN 1994-1-1:2005/NA – Еврокод 4: Проектиране на комбинирани стомано-стоманобетонни конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради.

3. Венков, Л., Б., Захариева-Георгиева. Еврокод 4: Проектиране на комбинирани стомано-стоманобетонни конструкции в сгради. София, 2013.

## RESISTANCE OF CONCRETE ENCASED STEEL SECTIONS OF COMPOSITE COLUMNS MADE OF DIFFERENT CONCRETE STRENGTH CLASSES SUBJECTED TO COMBINED COMPRESSION AND UNI-AXIAL BENDING

Ts. Kolev<sup>1</sup>

*Keywords: composite steel-concrete columns, compression and uni-axial bending*

*Research area: reinforced concrete and reinforced concrete structures*

### ABSTRACT

This report considers a method for determining the resistance of eccentrically loaded concrete encased steel composite column cross-sections. Rectangular cross-sections of composite steel-concrete columns made of reinforcing steel grade B500, structural steel grade S275 and different strength classes of concrete are considered. The rectangular and the bilinear diagram from Eurocode 2 and the rectangular concrete diagram extending up to the neutral axis regulated in Eurocode 4 are used. Conclusions are made based on the obtained results of cross-sections of the columns for the different concrete strength classes and for the accepted different concrete stress-strain diagrams. The purpose of the report is to expand the scope of Eurocode 4 by the presented method.

---

<sup>1</sup> Tsanko Kolev, Eng. PhD student, Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: outlook@abv.bg