



DOI: [10.71167/uaceg.2026.590104](https://doi.org/10.71167/uaceg.2026.590104)

Получена: 04.09.2025 г.

Приета: 05.12.2025 г.

ОПРОСТЕН КОНТРОЛ НА ШИРОЧИНАТА НА ПУКНАТИНИТЕ В СТОМАНОБЕТОННИ ЕЛЕМЕНТИ СЪГЛАСНО ПРОЕКТА ЗА ЕВРОПЕЙСКИ СТАНДАРТ prEN 1992-1-1:2021E

М. Георгиева¹

Ключови думи: стоманобетонни елементи, пукнатини

РЕЗИЮМЕ

В статията са анализирани новите правила за индиректен опростен контрол на широчината на нормални пукнатини в опънатата зона на стоманобетонни елементи чрез ограничаване на диаметъра на надлъжните армировъчни пръти. Изследвани са основните параметри, които оказват влияние върху граничните стойности на диаметъра на опънатите пръти. Направени са коментари, изводи и препоръки за практическо приложение.

1. Въведение

Съгласно Еврокод 2 [1 – 3] ограничаването на широчината на нормалните пукнатини в стоманобетонни елементи може да се постигне по следните начини:

- влагане на минимално количество надлъжна армировка в опънатата зона на сеченията;
- ограничаване на диаметрите на надлъжните армировъчни пръти или на разстоянията между тях;
- изчисляване на широчината на нормалните пукнатини (перпендикулярни на надлъжната ос на елемента) и сравняването ѝ с гранична стойност.

В проекта на европейски стандарт за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции [4] са дадени нови правила за индиректен опростен контрол на широчината

¹ Мария Георгиева, ас. инж., кат. „Масивни конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: m.georgieva_fce@uacg.bg

на нормални пукнатини в опънатата зона на стоманобетонни елементи чрез използване на формули за изчисляване на максималния диаметър на надлъжните армировъчни пръти или на максималното разстояние между тях.

В настоящата статия е анализирана формулата за определяне на максималния диаметър на опънните пръти и на включените в тях параметри и са направени коментари.

2. Опростен контрол на широчината на нормалните пукнатини в стоманобетонни елементи чрез ограничаване на диаметъра на надлъжните пръти

Широчината на нормалните пукнатини в опънатата зона на стоманобетонни елементи зависи от редица параметри, включително от диаметъра на прътите и от разстоянието между тях. Чрез по-голяма дисперсност (малки диаметри за сметка на по-малка стъпка) може да се постигне ограничаване на широчината на пукнатините до граничната широчина. В таблица 7.2N и таблица 7.3N на действащия понастоящем стандарт за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции [1] са дадени стойности на максималния диаметър на оребрени надлъжни пръти и на максималното разстояние между прътите при съответни напрежения в надлъжната армировка, които за ненапрегнати елементи се изчисляват при квазипостоянна комбинация на въздействията. Тези стойности се основават на редица приемания, валидни за много специфични случаи: бетонно покритие на опънатата армировка $c = 25\text{ mm}$; средна якост на опън на бетона в момента на поява на пукнатина $f_{ct,eff} = 2,9\text{ MPa}$ (в сила за бетон клас C30/37 при напукване на възраст 28 дни или по-късно); коефициент $k = 1,0$ (съответства на височина на напречното сечение $h \leq 300\text{ mm}$); коефициенти $k_c = 0,4$ и $k_2 = 0,5$ (отнасят се за елементи, натоварени на чисто огъване); $(h-d) = 0,1h$ (d е полезната височина на сечението) и други. Допълнително са указани корекционни коефициенти за отчитане на други ситуации, което значително затруднява практическото използване на таблиците и обърква проектантите конструктори на стоманобетонни конструкции. Освен това при някои от дадените стойности в таблица 7.2N и таблица 7.3N на [1] не е отчетено, че за осигуряване на сцепление между бетон и надлъжна армировка се изисква бетонното покритие да не бъде по-малко от диаметъра на прътите. При бетонно покритие $c = 25\text{ mm}$ не може да се използват диаметри $\phi > 25\text{ mm}$, а в таблиците са дадени дори стойности $\phi = 32\text{ mm}$ и $\phi = 40\text{ mm}$.

Замяната на таблица 7.2N и таблица 7.3N на [1] с формули за ограничаване на диаметъра ϕ и на разстоянието s_l между надлъжните пръти в [4] значително улеснява индиректния контрол на широчината на нормалните пукнатини в опънатата зона на стоманобетонните елементи. Максималният диаметър на надлъжните пръти ϕ за контрол на пукнатините в стоманобетонните елементи се изчислява по формула (1):

$$\phi = \frac{2,1\rho_p}{\frac{r}{d}k_{fl,simpl}k_{b,simpl}} \left(\frac{w_{lim,cal}}{k_w k_{l/r,simpl} \cdot 0,9 \frac{\sigma_s}{E_s}} - 1,5c \right), \quad (1)$$

където ρ_p е коефициент на армиране в опънната зона; за ненапрегнати елементи

$$\rho_p = \frac{A_s}{b \cdot d};$$

A_s – площ на надлъжната армировка в опънната зона на напречното сечение в mm^2 ;

b – ширина на напречното сечение, mm ;

$w_{lim,cal}$ – гранична стойност на изчислителната ширина на пукнатините, mm ;

c – бетонно покритие на надлъжната армировка, mm ;

$r = c + \phi / 2$ – разстояние от бетонната повърхност до центъра на прътите в първи ред, mm ;

$k_{fl,simpl} = 1 - 3,5 \frac{r}{h}$ – когато едната страна на сечението е натисната;

$k_{fl,simpl} = 1$ – когато и двете страни на сечението са опънати;

$k_{b,simpl} = 0,9$ при добри условия на сцепление между бетон и армировка;

$k_{b,simpl} = 1,2$ при недобри (лоши) условия на сцепление между бетон и армировка;

$k_{1/r,simpl} = 25 \left(\frac{h}{d} - 1 \right) \rho_p + 1,15 \frac{h}{d} - 0,15$ – коефициент, отчитащ увеличаването на

ширината на пукнатината поради кривината;

σ_s – допустимо напрежение в армировката, разположена най-близо до най-опънатата бетонна повърхност на сечението след образуване на всички пукнатини; σ_s може да се изчисли според натоварванията или да се приеме по-ниско напрежение $\sigma_{s,lim}$;

E_s – изчислителна стойност на модула на еластичност на армировъчната стомана;

$k_w = 1,7$ – коефициент, превръщащ средната ширина на пукнатината в изчислителна (максимална) ширина на пукнатината.

За гарантиране на приемлив външен вид на стоманобетонните елементи се нормира гранична стойност $w_{lim,cal} = 0,4 \text{ mm}$, а за осигуряване на дълготрайност на елементите при клас по въздействие на околната среда XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XS1, XS2 или XS3 се приема $w_{lim,cal} = 0,3 k_{surf}$, mm . Коефициентът k_{surf} отчита разликата между увеличената ширина на пукнатината на повърхността на елемента и изискваната средна ширина на пукнатината според стойностите на минималното покритие $c_{min,dur}$ съгласно изискванията за дълготрайност: $1,0 \leq k_{surf} = c_{akt} / (10 \text{ mm} + c_{min,dur}) \leq 1,5$, където $c_{akt} \geq c_{nom}$, е действително определеното бетонно покритие при конструиране на елемента или при изпълнение.

Формула (1) се извежда от формулата за изчислителната ширина на повърхностната пукнатина $w_{k,cal}$, дадена в [4], при приемане на опростяващи предпоставки:

$$w_{k,cal} = k_w s_{rm,cal} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \leq w_{lim,cal}, \quad (2)$$

където $s_{rm,cal}$ е изчислително средно разстояние между пукнатините (максималната дължина, по която има приплъзване между бетона и стоманата в съседство с пукнатината);

ε_{sm} – средна деформация в армировката, която е най-близо до най-опънатата бетонна повърхност при съответната комбинация от въздействия, включително ефекта от принудени деформации и с отчитане на ефектите от опънното закоравяване;

ε_{cm} – средна деформация на бетона между пукнатини на нивото на ε_{sm} .

За получаване на формула (1) ефектите от опънното закоравяване се оценяват като 10%-но намаление на напрежението в стоманата, получено в етапа на стабилизирано напукване, при което разликата между средните деформации се приема:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} \approx 0,9 \frac{\sigma_s}{E_s} k_{1/r, simpl} \cdot \quad (3)$$

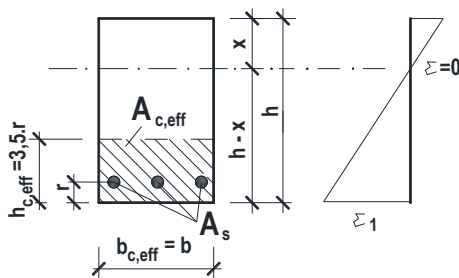
Средното разстояние между пукнатините $s_{rm, cal}$ се изчислява за случай, при който разстоянието между центровете на прътите на армировката в опънната зона, работеща със сцепление с бетона, е $s \leq 10\phi$:

$$s_{rm, cal} = 1,5c + \frac{k_{fl, simpl} k_{b, simpl}}{7,2} \cdot \frac{\phi}{\rho_{p, eff}}, \quad (4)$$

където $\rho_{p, eff} = \frac{A_s}{A_{c, eff}}$ е ефективен коефициент на армиране в опънната зона за ненапрегнати стоманобетонни елементи;

$A_{c, eff}$ – ефективна площ на бетона в опънната зона.

Приема се армировка в един ред и консервативна стойност за ефективната площ на бетона в опънната зона $A_{c, eff} = A_{c, eff, max} = 3,5r b$, т.е. приемат се максимални размери на ефективната опънна зона: височина $h_{c, eff} = 3,5r$ и ширина $b_{c, eff} = b$ (фиг. 1).



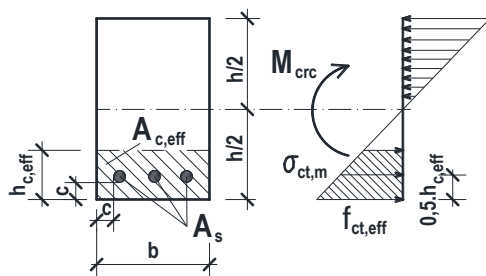
Фиг. 1. Максимална ефективна площ на бетона в опънната зона

Ефективният коефициент на армиране $\rho_{p, eff}$ при ненапрегнати елементи се изразява чрез коефициента на надлъжно армиране в опънната зона ρ_p [5] посредством формула (5):

$$\rho_{p, eff} = \frac{A_s}{A_{c, eff}} = \frac{A_s}{3,5r b} \cdot \frac{d}{d} = \rho_p \frac{d}{3,5r} \cdot \quad (5)$$

Максималният диаметър на надлъжните пръти се получава при широчина на нормалните пукнатини $w_{k,cal} = w_{lim,cal}$. Заместват се формули (3), (4) и (5) във формула (2) и след преработка се получава формула (1).

Коефициентът $k_{fl,simpl}$ във формула (1) отчита факта, че средните напрежения в бетона в ефективната зона $\sigma_{ct,m}$ непосредствено преди напукване са по-малки от средната му якост на опън $f_{ct,eff}$ в момента на поява на пукнатина (фиг. 2): $\sigma_{ct,m} = k_{fl,simpl} f_{ct,eff}$. Изключение прави случаят на натоварване на централен опън, при който $\sigma_{ct,m} = f_{ct,eff}$.



Фиг. 2. Напрежения в бетона непосредствено преди поява на пукнатина при огъване

При елементи с правоъгълно напречно сечение, подложени на чисто огъване, височината на натисковата зона непосредствено преди образуване на пукнатина е $x = 0,5h$ (фиг. 2). При приемане на максимална височина на ефективната опънна зона $h_{c,eff} = h_{c,eff,max} = 3,5r$, за коефициента $k_{fl,simpl}$ се получава опростената формула, дадена в (4):

$$k_{fl,simpl} = \frac{0,5h - 0,5h_{c,eff}}{0,5h} = 1 - \frac{3,5r}{h} \quad (6)$$

С цел опростяване формула (6) се прилага и за случаите на нецентричен опън с голям ексцентрицитет, а също и при нецентричен натиск, когато е налице и опънна зона в сечението. Тъй като в (4) не е указано изрично, че формула (6) е в сила само при правоъгълно напречно сечение, тя се използва при произволно сечение на елемента.

Коефициентът $k_{b,simpl}$ във формула (1) отчита условията на сцепление между бетона и надлъжната опънна армировка. Проведените експериментални изследвания [6] показват, че позицията на армировката при бетонирането оказва влияние върху разстоянието между надлъжните пукнатини, а следователно и върху широчината им. В съществуващия стандарт [1] при надлъжни пръти, разположени близо до горната повърхност на елементи с височина $h > 250 \text{ mm}$, граничното напрежение на сцепление между бетон и армировка се намалява с коефициент 0,7 заради появата на празнини под горните пръти поради утаяването на бетонната смес и изпарение на част от излишната вода, което намалява периметъра на сцепление на прътите. В този случай условията на сцепление се разглеждат като недобри (лоши) и дължините на закотвяне и на снаждане на горните надлъжни пръти се увеличават с коефициент $1/0,7 \approx 1,4$. Според експерименталните изследвания [6] при греди с долна опънна армировка, работеща при добри условия на сцепление с бетона, се образуват повече на брой по-гъсто разположени

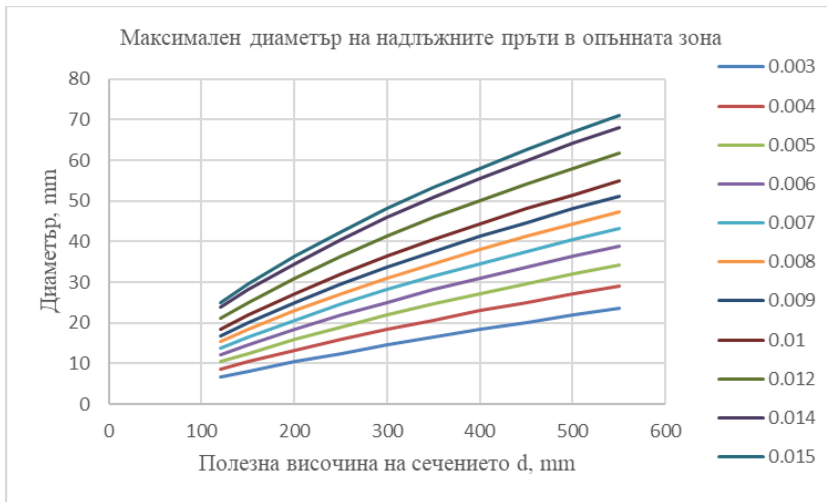
видими пукнатини, отколкото при образци с горна опънна армировка, при които пукнатините са по-малко на брой и са разположени на по-голямо разстояние помежду си. С въвеждането на коефициента $k_{b,simpl}$ във формула (1) на практика се признава, че позицията на надлъжната армировка при бетонирването е важен фактор при определяне на разстоянието между пукнатините и на широчината им. При добри условия на сцепление в [4] се приема не $k_{b,simpl} = 1$, а $k_{b,simpl} = 0,9$. Тази стойност се доближава до експериментално получените резултати [6].

Коефициентът $k_{1/r,simpl}$ във формула (1) отразява факта, че при огъване, нецентричен опън и нецентричен натиск широчината на пукнатината се увеличава от нивото на опънната армировка към най-опънатата повърхност на елемента поради кривината. Увеличаването на отварянето на пукнатината е пропорционално на коефициента $k_{1/r,simpl}$. Зависимостта на този коефициент от коефициента на армиране на надлъжната опънна армировка ρ_p означава, че при увеличаване на коефициента на армиране усилието в натисковата зона на бетона също се увеличава и кривината нараства при същата деформация на опънната армировка [5]. При центричен опън би могло да се приеме $k_{1/r,simpl} = 1$, тъй като тогава няма изкривяване на елемента от приложената осова сила, макар че влияние оказва съсъхването на бетона преди натоварването с външен товар и различната позиция на армировката (долна и горна).

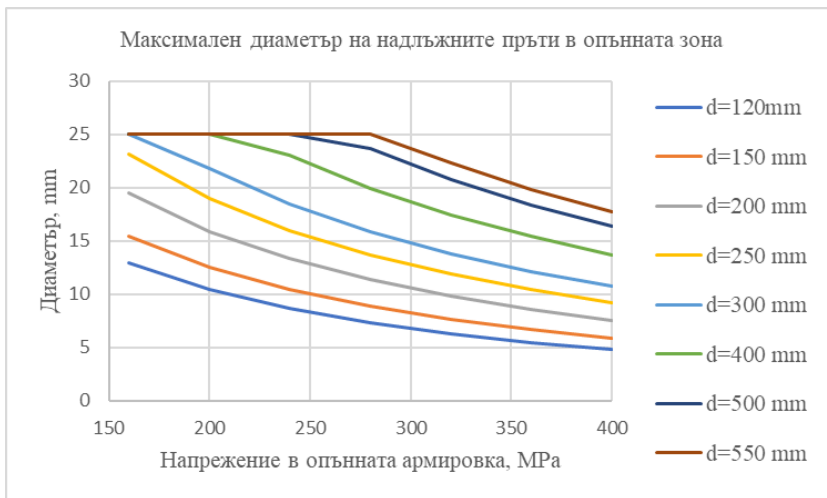
Тъй като във формула (1) за определяне на максималния диаметър ϕ на надлъжните опънни пръти единият от параметрите е разстоянието r от центъра на прътите в първи ред до бетонния ръб на напречното сечение, което зависи от диаметъра на армировъчните пръти ($r = c + \phi / 2$), авторът предлага формула (1) да се преработи с оглед на изключване на r . Получава се квадратно уравнение по отношение на ϕ , решението на което дава формула (7) за определяне на максималния диаметър на опънната армировка с цел контрол на пукнатините в стоманобетонните елементи:

$$\phi = -c + \sqrt{c^2 + \frac{4,2\rho_p d}{k_{fl,simpl} k_{b,simpl}} \left(\frac{w_{lim,cal}}{k_w k_{1/r,simpl} \cdot 0,9 \frac{\sigma_s}{E_s}} - 1,5c \right)}. \quad (7)$$

На фиг. 3 са дадени графики, показващи изменението на максималния диаметър на опънните пръти ϕ , изчислен по формула (7), в елементи, подложени на центричен опън, в зависимост от полезната височина на сечението d и от коефициента на армиране в опънната зона ρ_p при бетонно покритие $c = 25$ mm, напрежение в опънната армировка $\sigma_s = 200$ МПа, гранична широчина на пукнатините $w_{lim,cal} = 0,4$ mm и $k_{b,simpl} = 0,9$. От фиг. 3 се вижда, че при големи стойности на коефициента на армиране ρ_p и при големи височини на напречното сечение на елемента по формулата се получават недопустимо големи диаметри (по-големи от бетонното покритие c и от максималния номинален диаметър 40 mm на произвежданите горещовалцовани оребрени пръти за армиране на бетон). Ето защо авторът предлага отдясно във формула (1) и във формула (7) да се въведе ограничението $\phi \leq \min(c; 40\text{ mm})$.



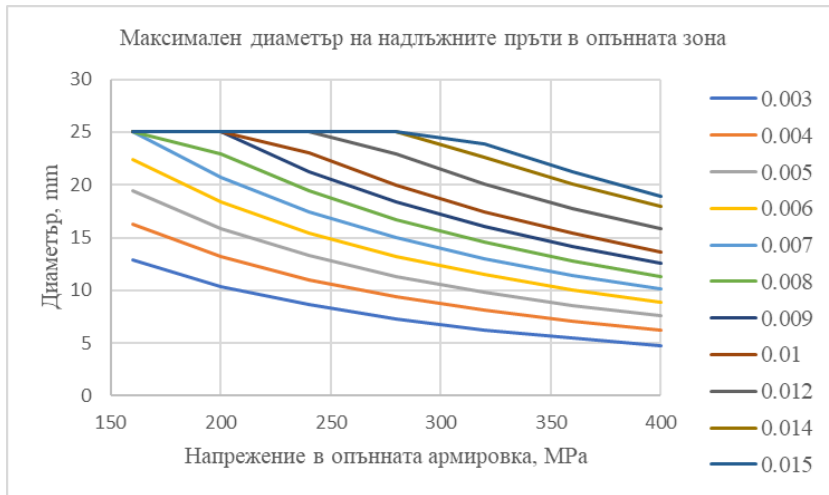
Фиг. 3. Максимален диаметър на надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на центричен опън, при $c = 25 \text{ mm}$; $\sigma_s = 200 \text{ MPa}$; $w_{lim,cal} = 0,4 \text{ mm}$ и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от полезната височина на напречното сечение d и от коефициента на армиране ($\rho_p = 0,003 \div 0,015$)



Фиг. 4. Максимален диаметър на надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на центричен опън, при $c = 25 \text{ mm}$; $\rho_p = 0,005$; $w_{lim,cal} = 0,4 \text{ mm}$ и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от напрежението в опънната армировка σ_s и от полезната височина на сечението d

Графиките на фиг. 4 показват намаляване на максималния диаметър на надлъжните пръти за контрол на пукнатините при нарастване на напрежението σ_s в опънната армировка при елементи, подложени на центричен опън, както и обратна тенденция – увеличаване на стойностите на максималния диаметър с увеличаване на полезната

височина на сечението d . Хоризонталният участък на графиките при големи височини на напречното сечение е свързан с въвеждане от автора на ограничението $\phi \leq c$ с оглед на осигуряване на сцепление между бетон и надлъжна армировка, т.е. гарантиране на съвместната работа на двата материала в участъците между нормалните пукнатини. Подобни графики ще се получат и при елементи, подложени на огъване. Ето защо при стоманобетонните плочи, при които обичайно дебелините са много по-малки от височините на напречните сечения на стоманобетонните греди, за армиране се използват армировъчни пръти с малки диаметри (обикновено $\phi 6$; $\phi 8$; $\phi 10$; $\phi 12$ при плочи от стоманобетонни гредови подови конструкции) – армирането с опънни пръти с големи диаметри може да доведе до отваряне на пукнатини с недопустима широчина.

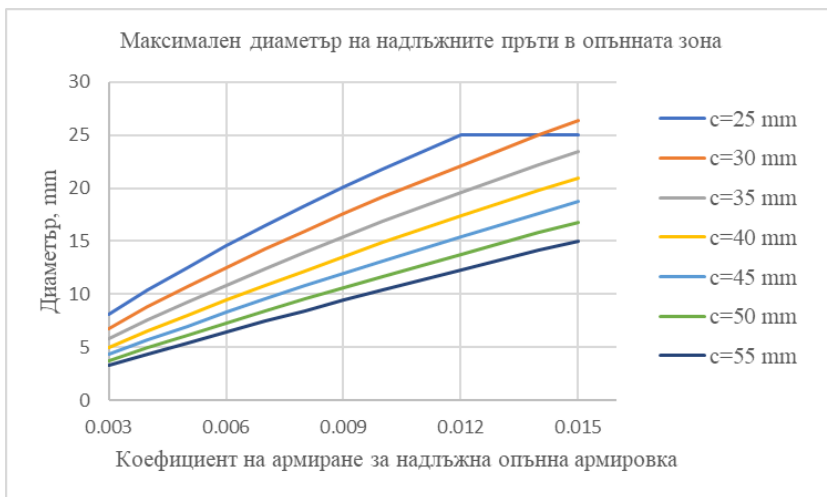


Фиг. 5. Максимален диаметър на надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на центричен опън, при $c = 25$ mm; $d = 200$ mm; $w_{lim,cal} = 0,4$ mm и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от напрежението в опънната армировка σ_s и от коефициента на армиране ($\rho_p = 0,003 \div 0,015$)

На фиг. 5 са дадени графики, показващи изменението на максималния диаметър ϕ на надлъжните пръти в зависимост от напрежението в надлъжната армировка σ_s и от коефициента на надлъжно армиране ρ_p при стоманобетонни елементи, подложени на центричен опън. С увеличаване на напрежението в опънната армировка стойностите на ϕ_{max} намаляват, а с увеличаване на коефициента на надлъжно армиране ρ_p стойностите на максималния диаметър на прътите нарастват. При големи стойности на ρ_p се получава хоризонтален участък в графиките поради въвеждане на ограничението $\phi \leq c$.

Графиките на фиг. 6 показват изменението на максималния диаметър ϕ на надлъжните пръти в зависимост от коефициента на надлъжно армиране ρ_p и бетонното покритие c на армировката при стоманобетонни елементи, подложени на центричен опън. Влагането в елементите на опънна армировка с по-голям коефициент на армиране дава възможност за използване на по-големи диаметри на прътите. При вариране на

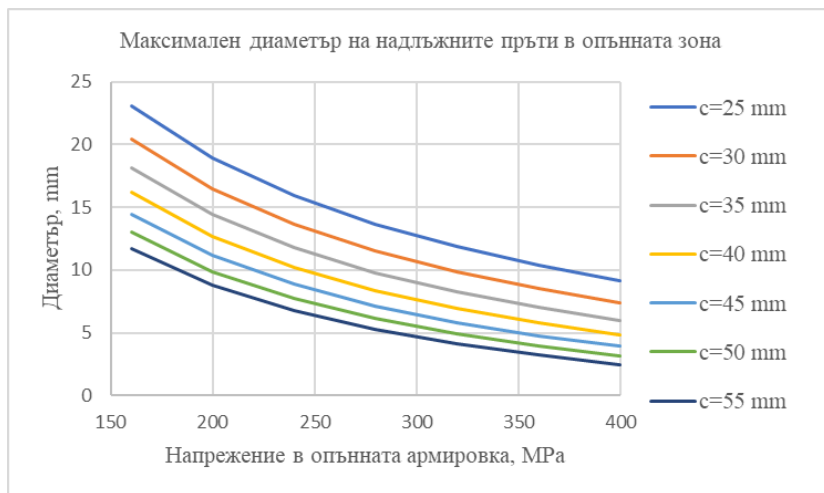
коэффициента ρ_p в границите от $\rho_p = 0,003$ до $\rho_p = 0,015$ стойностите на ϕ_{\max} се увеличават до 3 ÷ 4 пъти в зависимост от стойностите на другите параметри, участващи във формула (1) и формула (7). Съществено е и влиянието на бетонното покритие на армировката. Налице е над 100 % разлика в стойностите на ϕ_{\max} в случаите на използване на малко бетонно покритие (обикновено $c = 25$ mm) и на голямо бетонно покритие (например $c = 55$ mm). В някои случаи, поради изискване за осигуряване на по-голяма граница на огнеустойчивост на стоманобетонните елементи или при работа на елементите в агресивни среди, е необходимо осигуряване на по-голямо бетонно покритие на армировката, което налага използване на пръти с много малки диаметри, особено при малки коефициенти на армиране ρ_p . В графиката при $c = 25$ mm се получава хоризонтален клон, поради изискването бетонното покритие да не бъде по-малко от диаметъра ϕ на армировъчните пръти.



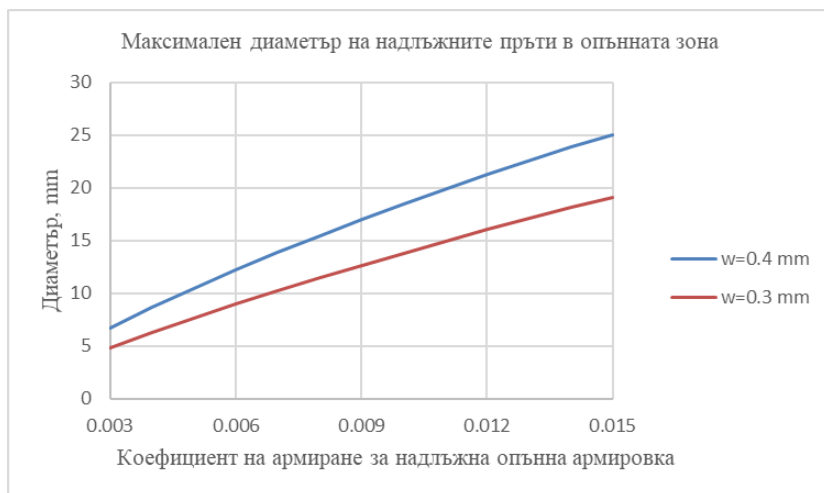
Фиг. 6. Максимален диаметър на надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на центричен опън, при $\sigma_s = 160$ MPa; $d = 150$ mm; $w_{lim,cal} = 0,4$ mm и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от коефициента на армиране ρ_p и от бетонното покритие на армировката c

Значително влияние върху стойността на максималния диаметър на опънните пръти за контрол на пукнатините оказва напрежението в надлъжната армировка σ_s . На фиг. 7 е дадено изменението на ϕ_{\max} в зависимост от напрежението σ_s и от бетонното покритие на армировката c при елементи, подложени на центричен опън. При нарастване на напрежението σ_s от 160 MPa до 400 MPa стойностите на ϕ_{\max} намаляват със съответно 150 % до 370 % в зависимост от бетонното покритие (по-голямо процентно намаление се наблюдава при по-голямо бетонно покритие c). От графиките се вижда, че при напрежение $\sigma_s \geq 300$ MPa и голямо бетонно покритие за ϕ_{\max} се получават много малки стойности (под 6 mm). Това означава, че в тези случаи стоманобетонните елементи не могат да се армират с горещовалцувана армировъчна стомана клас B420 и клас B500, тъй

като от тези класове стомана се произвеждат пръти за армиране с минимален диаметър $\phi 6(\phi 8)$. Следователно при големи напрежения в надлъжната армировка и голямо бетонно покритие на армировката стоманобетонните елементи, подложени на центричен опън, трябва да са предварително напрегнати.



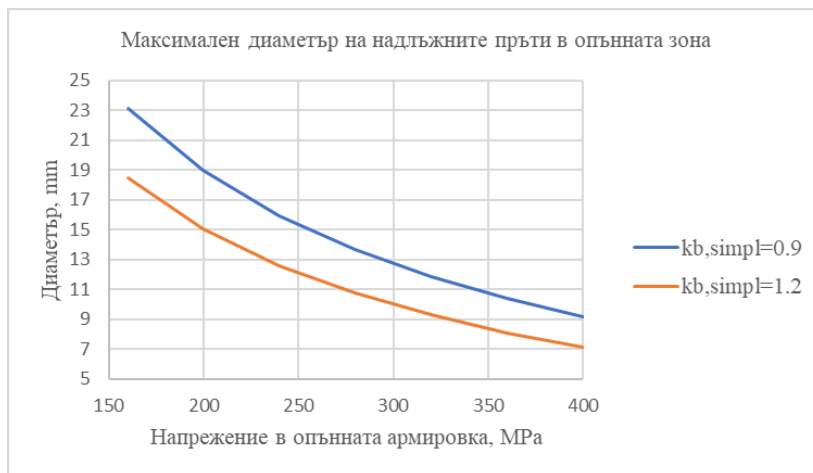
Фиг. 7. Максимален диаметър на надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на центричен опън, при $\rho_p = 0,005$; $d = 250$ mm; $w_{lim,cal} = 0,4$ mm и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от напрежението σ_s и от бетонното покритие на армировката c



Фиг. 8. Максимален диаметър на надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на центричен опън, при $c = 25$ mm; $\sigma_s = 240$ МПа; $d = 150$ mm и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от коефициента на армиране ρ_p и от граничната широчина на пукнатините $w_{lim,cal}$

Влиянието на стойността на граничната изчислителна широчина на пукнатините $w_{lim,cal}$ върху ϕ_{max} може да се проследи на фиг. 8. За разгледания случай на елементи, натоварени на центричен опън, при конкретните стойности за бетонно покритие на армировката, напрежение в нея и полезна височина на сечението се получават разлики между 31 % и 39 % в получените по формула (7) стойности за максималния диаметър ϕ при гранични широчини на пукнатините $w_{lim,cal} = 0,4 \text{ mm}$ и при $w_{lim,cal} = 0,3 \text{ mm}$. С увеличаване на коефициента на надлъжно армиране ρ_p процентната разлика между стойностите на ϕ_{max} при различните гранични широчини на пукнатините намалява. Армирането на стоманобетонните елементи с надлъжна опънна армировка с по-голям коефициент на армиране позволява използването на по-големи диаметри на армировъчните пръти (фиг. 6; фиг. 8).

Позицията на надлъжната опънна армировка при бетонирането е важен фактор при определяне на стойността на максималния диаметър на прътите (фиг. 9).



Фиг. 9. Максимален диаметър на надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на центричен опън, при $c = 25 \text{ mm}$; $\rho_p = 0,005$; $d = 250 \text{ mm}$ и $w_{lim,cal} = 0,4 \text{ mm}$ в зависимост от напрежението в опънната армировка σ_s и от позицията на опънните пръти при бетониране

Стойностите на ϕ_{max} са по-големи за долната опънна армировка, която работи при добри условия на сцепление с бетона ($k_{b,simpl} = 0,9$). За горната армировка в елементи с височина $h > 250 \text{ mm}$, работеща при недобри (лоши) условия на сцепление с бетона ($k_{b,simpl} = 1,2$), трябва да се влагат опънни пръти с по-малки диаметри. При разглежданите случаи на фиг. 9 разликите в стойностите на максималния диаметър варират в границите 24 % ÷ 28 % в зависимост от позицията на опънната армировка, като по-големи процентни разлики са установени при по-големи напрежения.

При анализиране на формула (1) и формула (7) прави впечатление фактът, че според нея максималният диаметър на опънните пръти не зависи от якостта на опън на

бетона в момента на поява на пукнатина, който е основен параметър при изготвяне на таблица 7.2N в действащия понастоящем стандарт за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции [1]. Следователно според проекта на европейски стандарт за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции [4] стойностите на ϕ_{\max} не се влияят от класа на вложения в елементите бетон.

3. Заключение

В резултат на анализите и констатациите в настоящата статия могат да се направят следните изводи:

Замяната на таблица 7.2N на [1] с формула за ограничаване на диаметъра ϕ на надлъжните опънни пръти в [4] значително улеснява индиректния контрол на широчината на нормалните пукнатини в опънната зона на стоманобетонните елементи. Формула (1) за определяне на максималния диаметър ϕ_{\max} е изведена при приемане на опростяващи предпоставки, поради което трябва да се прилага внимателно от проектантите.

Тъй като във формула (1) за определяне на ϕ_{\max} единият от параметрите е разстоянието r от центъра на прътите в първи ред до бетонния ръб на напречното сечение, което зависи от диаметъра на армировъчните пръти ($r = c + \phi / 2$), авторът предлага формула (1) да се преработи с оглед на изключване на r и да се използва формула (7).

При големи стойности на коефициента на армиране ρ_p и при по-големи височини на напречното сечение на елемента се получават недопустимо големи диаметри на надлъжните пръти (по-големи от бетонното покритие c и от максималния номинален диаметър 40 mm на произвежданите горещовалцувани оребрени пръти за армиране на бетон). Ето защо авторът предлага отдясно във формула (1) и във формула (7) да се въведе ограничението $\phi \leq \min(c; 40 \text{ mm})$.

Стойността на максималния диаметър на надлъжните опънни пръти зависи от редица параметри. Най-голямо влияние върху ϕ_{\max} оказва напрежението в опънната армировка σ_s , коефициентът на надлъжно армиране ρ_p , полезната височина на напречното сечение d и бетонното покритие на армировъчните пръти c .

Изготвените графики показват намаляване на максималния диаметър на надлъжните пръти за контрол на пукнатините при нарастване на напрежението σ_s в опънната армировка при елементи, подложени на центричен опън, както и обратна тенденция – увеличаване на стойностите на максималния диаметър с увеличаване на полезната височина на сечението d .

Армирането на стоманобетонните елементи с надлъжна опънна армировка с по-голям коефициент на армиране позволява използването на по-големи диаметри на армировъчните пръти.

Налице е над 100 % разлика в стойностите на ϕ_{\max} в случаите на използване на малко бетонно покритие (обичайно $c = 25 \text{ mm}$) и на голямо бетонно покритие (например $c = 55 \text{ mm}$). При осигуряване на по-голямо бетонно покритие на армировката (например при по-голяма изисквана граница на огнеустойчивост на стоманобетонните елементи или при работа на елементите в агресивни среди) се налага използване на пръти с много малки диаметри за контрол на пукнатините, особено при малки коефициенти на армиране ρ_p .

За разгледаните случаи на стоманобетонни елементи, натоварени на централен опън, се получават разлики между 31 % и 39 % в получените по формула (7) стойности за максималния диаметър ϕ при гранични широчини на пукнатините $w_{lim,cal} = 0,4 \text{ mm}$ и при $w_{lim,cal} = 0,3 \text{ mm}$. С увеличаване на коефициента на надлъжно армиране ρ_p процентната разлика между стойностите на ϕ_{max} при различните гранични широчини на пукнатините намалява.

Новост при определянето на максималния диаметър на надлъжната опънна армировка е отчитането на приноса на позицията на прътите при бетониране, т.е. на условията на сцепление с бетона. Стойностите на ϕ_{max} са по-големи за долната опънна армировка, която работи при добри условия на сцепление с бетона. За горната армировка в елементи с височина $h > 250 \text{ mm}$, работеща при недобри (лоши) условия на сцепление с бетона, трябва да се влагат пръти с по-малки диаметри.

Върху стойностите на максималния диаметър на прътите в опънната зона на сеченията влияние оказват също характерът на напрегнатото състояние на елементите (дали има натискова зона или сеченията са изцяло опънати) и кривината на елемента, която води до увеличаване на широчината на нормалните пукнатини. Коефициентите, отчитащи тези фактори ($k_{fl,simpl}$ и $k_{1/r,simpl}$), зависят и от диаметъра на надлъжните пръти при елементи, подложени на огъване, нецентричен опън с голям ексцентрицитет и нецентричен натиск с голям ексцентрицитет, поради което при тези елементи не може еднозначно да се определи ϕ_{max} по формула (1) или формула (7) – получава се итерационен процес при изчисляване на максималния диаметър на прътите.

Според проекта на европейски стандарт за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции [4] стойностите на ϕ_{max} не се влияят от класа на вложения в елементите бетон, т.е. от якостта на опън на бетона в момента на появата на пукнатина.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. BDS EN 1992-1-1:2005 – Evrokod 2: Projektirane na betonni i stomanobetonni konstruksii. Chast 1-1: Obshti pravila i pravila za sgradi, 2007.
2. Oksanovich, L. EC2. Vtora grupa granichni sastoyaniya. ABC Tehnika, 2010, ISBN 954-8873-99-0.
3. Rusev, K. Stomanobeton – NPBSK i EC. ABC Tehnika, 2008, ISBN 954-8873-86-4.
4. prEN 1992-1-1:2021E – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules – Rules for buildings, bridges and civil engineering structures, 2021.
5. Tue, N. V., Fehling, E., Schlicke, D., Krenn, C. Crack width verification and minimum reinforcement according to EC2 – current model with specifications in Germany and Austria versus proposal for revision. // Civil Engineering Design 2021:3:210-228. <https://doi.org/10.1002/cend.202100045>.
6. Pérez Caldentey, A., Garcia, R., Gribniak, V., Rimkus, A. Refined control of cracking. Background Document for FprEN 1992-1-1, CEN/TC 250/SC 2 N2087, p. 371 – 383.

SIMPLIFIED CONTROL OF CRACK WIDTH IN REINFORCED CONCRETE ELEMENTS ACCORDING TO THE DRAFT EUROPEAN STANDARD prEN 1992-1-1:2021E

M. Gueorguieva¹

Keywords: reinforced concrete elements, cracks

ABSTRACT

The paper analyzes the new rules for indirect simplified control of the width of normal cracks in the tension zone of reinforced concrete elements by limiting the diameter of the longitudinal reinforcing bars. The main parameters that influence the limiting values of the diameter of the tension bars are studied. Comments, conclusions and recommendations for practical application are made.

¹ Maria Gueorguieva, Assist. Prof. Eng., Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: m.georgieva_fce@uacg.bg