



DOI: [10.71167/uaceg.2026.590105](https://doi.org/10.71167/uaceg.2026.590105)

Получена: 04.09.2025 г.

Приета: 05.12.2025 г.

КОНТРОЛ НА ШИРОЧИНАТА НА ПУКНАТИНИТЕ В СТОМАНОБЕТОННИ ЕЛЕМЕНТИ ЧРЕЗ ОГРАНИЧАВАНЕ НА РАЗСТОЯНИЕТО МЕЖДУ НАДЛЪЖНИТЕ ПРЪТИ СЪГЛАСНО ПРОЕКТА ЗА ЕВРОПЕЙСКИ СТАНДАРТ prEN 1992-1-1:2021E

М. Георгиева¹

Ключови думи: стоманобетонни елементи, пукнатини

РЕЗЮМЕ

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

1. Въведение

В Еврокод 2 [1 – 3] са дадени няколко начина за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в стоманобетонни елементи, като изборът на решение се предоставя на проектантите.

В проекта на европейски стандарт за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции [4] са залегнали нови правила за опростен контрол на широчината на нормални пукнатини в опънатата зона на стоманобетонни елементи без директно изчисление чрез използване на формули за определяне на максималния диаметър на надлъжните армировъчни пръти или на максималното разстояние между тях.

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

В настоящата статия е анализирана формулата за определяне на максималното разстояние между опънните пръти за контрол на пукнатините и на включените в нея параметри, направени са коментари и изводи.

2. Контрол на широчината на нормалните пукнатини в стоманобетонни елементи чрез ограничаване на разстоянието между надлъжните пръти

Ограничаване на широчината на нормалните пукнатини до граничната стойност, нормирана в действащия понастоящем стандарт за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции [1], може да се постигне и чрез ограничаване на разстоянието между надлъжните пръти, разположени в опънната зона на елементите. В таблица 7.3N на [1] са дадени стойности на максималното разстояние между прътите за индиректен контрол на пукнатините при съответни напрежения в надлъжната армировка, които за ненапрегнати елементи се изчисляват при квазипостоянна комбинация на въздействията. Таблицата се прилага, когато в опънната зона е осигурена изискваната минимална армировка. Стойностите в таблицата са получени за елементи, подложени на огъване, на базата на редица приемания, валидни за много конкретни случаи, като не са указани корекционни коефициенти за отчитане на други ситуации, което създава проблеми при практическото ѝ използване.

С цел улесняване на индиректния контрол на широчината на нормалните пукнатини в опънната зона на стоманобетонните елементи е направена замяна на таблица 7.3N от [1] с формула за ограничаване на разстоянието s_l между надлъжните пръти в [4]. Максималното разстояние между опънните пръти s_l за контрол на пукнатините в стоманобетонните елементи в [4] се изчислява по формула (1):

$$s_l \leq \frac{3,45\rho_p}{\frac{r^2}{d} k_{fl,simpl}^2 k_{b,simpl}^2} \left(\frac{w_{lim,cal}}{k_w k_{1/r,simpl} \cdot 0,9 \frac{\sigma_s}{E_s}} - 1,5c \right)^2, \quad (1)$$

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

елементи $\rho_p = \frac{A_s}{bd}$;

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

b – широчина на напречното сечение, mm ;

d – полезна височина на напречното сечение, mm ;

$w_{lim,cal}$ – гранична стойност на изчислителната широчина 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 ;

ϕ – диаметър на надлъжните пръти в опънната зона на елемента;

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

$k_{fl,simpl} = 1$ – когато цялото сечение е опънато;

$k_{b,simpl}$ – коефициент, който отчита условията на сцепление между бетона и надлъжната опънна армировка: $k_{b,simpl} = 0,9$ при добри условия на сцепление между бетон и армировка; $k_{b,simpl} = 1,2$ при недобри (лоши) условия на сцепление между бетон и армировка;

$k_w = 1,7$ – коефициент, чрез който средната широчина на пукнатината се превръща в изчислителна (максимална) широчина на пукнатината;

$k_{1/r,simpl} = 25 \left(\frac{h}{d} - 1 \right) \rho_p + 1,15 \frac{h}{d} - 0,15$ – коефициент, отчитащ увеличаването на широчината на пукнатината от нивото на опънната армировка към най-опънатата повърхност на елемента 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 $\sigma_{s,lim}$ [5];

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

Коефициентът $k_{fl,simpl}$ във формула (1) отчита факта, че при елементи, подложени на огъване, нецентричен опън и нецентричен натиск (когато е налице и опънна зона в сечението) средните напрежения в бетона в ефективната опънна 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: $\sigma_{ct,m} = k_{fl,simpl} f_{ct,eff}$.

Въпреки че във формула (1) диаметърът на надлъжната опънна армировка ϕ не участва директно, той оказва косвено влияние върху стойността на s_l чрез разстоянието r от бетонната повърхност до центъра на прътите в първи ред и чрез полезната височина на напречното сечение d , т.е. отношението r^2/d зависи и от диаметъра ϕ на надлъжните опънни пръти. Освен това при огъване със или без осова сила (при наличие на опънна и натискова зона в сечението) стойностите на коефициентите $k_{fl,simpl}$ и $k_{1/r,simpl}$ също зависят от диаметъра на опънните пръти.

Тъй като изчислителната широчина на пукнатините се проверява върху опънната повърхност на стоманобетонните елементи, граничната стойност $w_{lim,cal}$ също се отнася за повърхността на елемента. Граничните напрежения в опънната армировка σ_s и граничните широчини на пукнатините $w_{lim,cal}$ се приемат по табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1. Гранични напрежения и гранични широчини на пукнатините за приемлив външен вид

Проверка	Изчисляване на минималната армировка за контрол на пукнатините	Максимален диаметър на прътите или максимално разстояние между прътите или алтернативна проверка на широчината на пукнатината	Проверка на напреженията в армировката, за да се избегне нееластична деформация при ЕГС
Комбинация на въздействията за изчисляване на σ_s	Усилията при образуване на пукнатини	Квазипостоянна комбинация на въздействията	Характеристична комбинация на въздействията
Гранични стойности на широчината на пукнатините $w_{lim,cal}$ или на напреженията σ_s	$\sigma_s \leq f_{yk}$ или $\sigma_s \leq \sigma_{s,lim}^*$	$w_{lim,cal} = 0,4 \text{ mm}$ $\sigma_s \leq f_{yk}$ или $\sigma_s \leq \sigma_{s,lim}^*$	$\sigma_s \leq 0,8 f_{yk}$
* Може да е необходима по-малка стойност $\sigma_s < f_{yk}$ за удовлетворяване на граничните широчини на пукнатините; за $\sigma_{s,lim}$ е дадена формула в [4].			

Таблица 2. Проверки за ограничаване на напрежението на натиск в бетона и широчината на пукнатините за дълготрайност

Клас по въздействие на околната среда	Комбинация на въздействията при ненапрегнати стоманобетонни елементи	
	Квазипостоянна	Характеристична
X0, XC1	–	$\sigma_c \leq 0,6 f_{ck}^*$
XC2, XC3, XC4	$w_{lim,cal} = 0,3 \text{ mm} \cdot k_{surf}$	
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3		
XF1, XF3, XF2, XF4	–	
$1,0 \leq k_{surf} = c_{akt} / (10 \text{ mm} + c_{min,dur}) \leq 1,5$; c_{akt} е действително определеното покритие $\geq c_{nom}$ при конструиране или при изпълнение.		
* Напрежението на натиск в бетона σ_c може да се увеличи до $0,66 f_{ck}$, ако бетонното покритие се увеличи с 10 mm или се осигури ограничаване чрез напречна армировка.		

Формула (1) се извежда при опростяващата предпоставка, че надлъжната армировка е разположена само в един ред в напречното сечение [6] и се използва само един диаметър на прътите, при което за коефициента на надлъжно армиране на ненапрегнати стоманобетонни елементи се получава формула (2):

$$\rho_p = \frac{A_{s,1}}{s_l d} = \frac{\pi \phi^2 / 4}{s_l d}, \quad (2)$$

където $A_{s,1}$ е площта на напречното сечение на един надлъжен прът.

За диаметра на прътите ϕ се прилага формула (3), дадена в [4] за определяне на максималния диаметър с цел контрол на нормалните пукнатини:

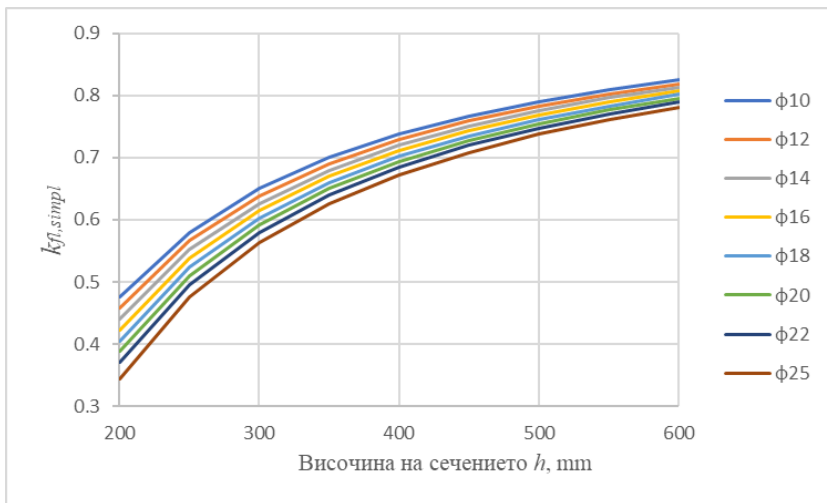
$$\phi = \frac{2,1\rho_p}{\frac{r}{d}k_{fl,simpl}k_{b,simpl}} \left(\frac{w_{lim,cal}}{k_w k_{1/r,simpl} \cdot 0,9 \frac{\sigma_s}{E_s}} - 1,5c \right). \quad (3)$$

От формула (2) се получава формула (4):

$$s_l = \frac{\pi\phi^2 / 4}{\rho_p d}, \quad (4)$$

в която се замества формула (3) за ϕ и след преработка се достига до формула (1).

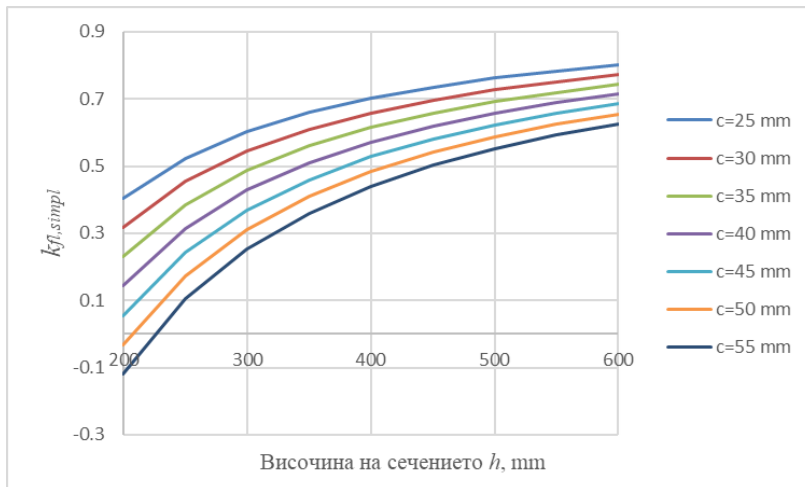
Формула (1) и формула (3) са изведени при допълнителни предпоставки. Ефектите от опънното закоравяване са отчетени чрез 10-процентно намаляване на напрежението σ_s в армировъчната стомана, получено в етапа на стабилизирано напукване. Средното разстояние между пукнатините е изчислено за случай, при който разстоянието между центровете на прътите на армировката в опънната зона, работеща със сцепление с бетона, е $s_l \leq 10\phi$. Приети са максимални размери на ефективната опънна зона на бетона: височина $h_{c,eff} = 3,5r$ и ширина $b_{c,eff} = b$.



Фиг. 1. Изменение на коефициента $k_{fl,simpl}$ при елементи с правоъгълно напречно сечение, подложени на огъване, при $c = 25\text{ mm}$ в зависимост от височината на напречното сечение h и от диаметъра на надлъжната опънна армировка ϕ

На фиг. 1 и фиг. 2 са показани графики за изменение на стойността на коефициента $k_{fl,simpl}$ при елементи с правоъгълно напречно сечение, подложени на огъване, в зависимост от височината на сечението h при различни диаметри на надлъжните опънни

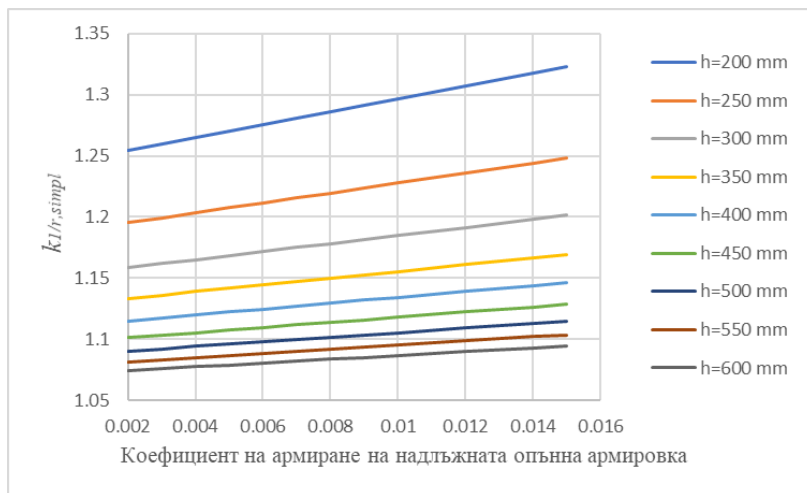
пръти ϕ и при различно бетонно покритие на армировката c . Бетонното покритие c оказва по-голямо влияние върху стойността на $k_{fl,simpl}$ от диаметъра на надлъжната опънна армировка. С увеличаване на височината на сечението този коефициент нараства значително, като при по-големи височини влиянието на диаметъра на прътите и на бетонното покритие върху стойността на $k_{fl,simpl}$ намалява.



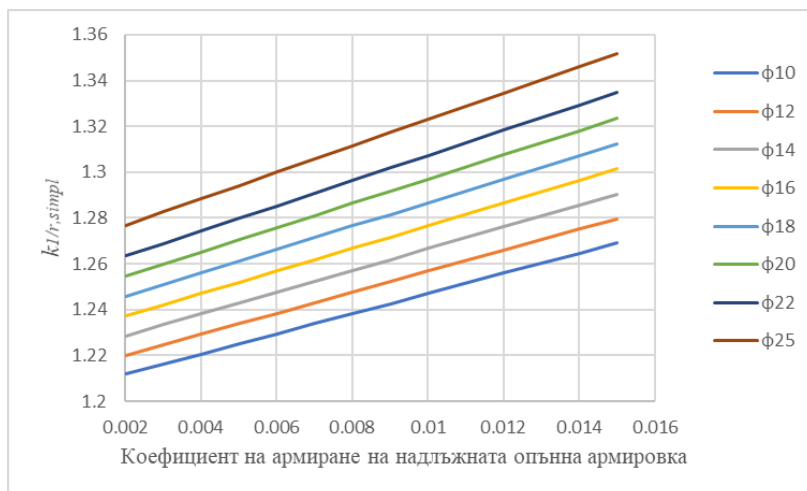
Фиг. 2. Изменение на коефициента $k_{fl,simpl}$ при елементи с правоъгълно напречно сечение, подложени на огъване, при $\phi 18$ в зависимост от височината на напречното сечение h и от бетонното покритие на надлъжната опънна армировка c

От фиг. 2 се вижда, че при малки височини на сеченията и при по-голямо бетонно покритие на надлъжната опънна армировка стойностите на $k_{fl,simpl}$ са много малки, дори могат да станат отрицателни. При бетонно покритие $c = h/3,5 - \phi/2$ стойността на този коефициент е $k_{fl,simpl} = 0$. Това означава, че по формула (1) ще се получат безкрайно големи стойности за максималното разстояние между опънните пръти s_l , което е нереалистично. Например при $h = 140$ mm; $\phi 10$ и $c = 35$ mm се получава $k_{fl,simpl} = 0$. Стойност $k_{fl,simpl} = 0$ означава, че средните напрежения в бетона в ефективната опънна зона $\sigma_{ct,m}$ непосредствено преди напукване на елемента са равни на нула, което не е вярно. При $c > h/3,5 - \phi/2$ стойността на $k_{fl,simpl}$ е отрицателна. Направените многобройни изчисления от автора доказват, че при малки стойности на $k_{fl,simpl}$ за разстоянието s_l се получават нереално големи стойности, което означава, че не винаги чрез използване на формула (1) може да се гарантира изискваният контрол на пукнатините. Проблемът произтича от факта, че формулата за $k_{fl,simpl}$ е получена при предпоставката, че за височината на ефективната опънна зона се приема максималната стойност $h_{c,eff} = h_{c,eff,max} = 3,5r$, която не винаги е меродавна [7]. Освен това изразът

$k_{fl,simpl} = 1 - 3,5 \frac{r}{h}$ е изведен за елементи с правоъгълно напречно сечение, подложени на чисто огъване. В случаите на нецентричен опън с голям ексцентрицитет или при нецентричен натиск, когато е налице и опънна зона в сечението, би трябвало да се използва друга формула. Необходими са допълнителни изследвания, за да се установи каква формула да се прилага, когато напречното сечение на елемента не е правоъгълно, а произволно.



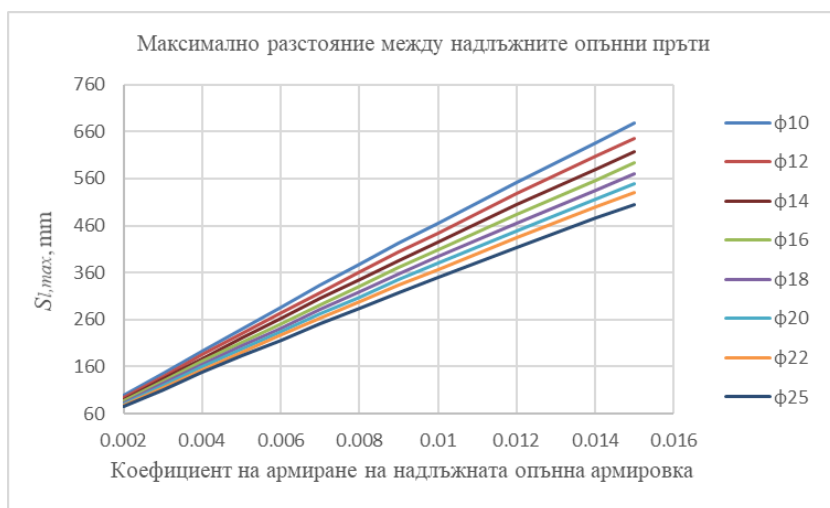
Фиг. 3. Изменение на коефициента $k_{1/r,simpl}$ при елементи, подложени на огъване със или без осова сила, при $c = 25 \text{ mm}$ и $\phi 20$ в зависимост от коефициента на армиране ρ_p и от височината на напречното сечение h



Фиг. 4. Изменение на коефициента $k_{1/r,simpl}$ при елементи, подложени на огъване със или без осова сила, при $c = 25 \text{ mm}$ и $h = 200 \text{ mm}$ в зависимост от коефициента на армиране ρ_p и от диаметъра на надлъжната опънна армировка ϕ

Графиките на фиг. 3 и фиг. 4 показват изменението на коефициента $k_{1/r,simpl}$ при елементи, подложени на огъване със или без осова сила, в зависимост от коефициента на армиране ρ_p и от височината на напречното сечение h или от диаметъра на надлъжната опънна армировка.

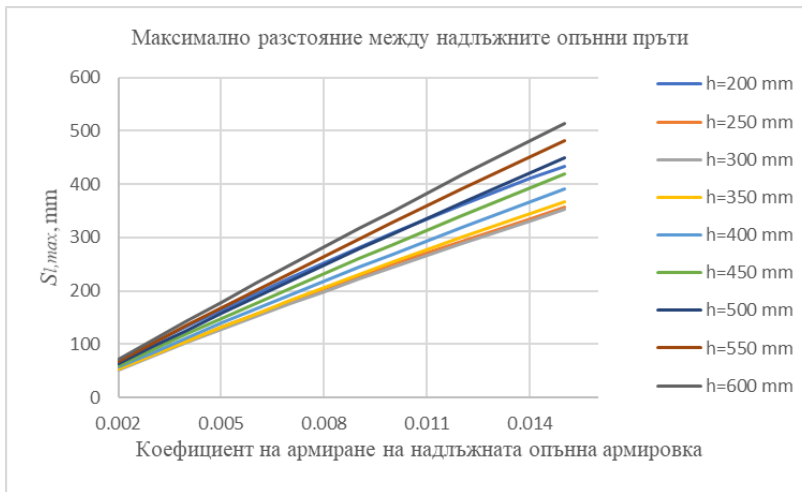
Влагането в елементите на надлъжна опънна армировка с по-голям коефициент на армиране ρ_p или по-големи диаметри довежда до увеличаване на стойността на коефициента $k_{1/r,simpl}$ (фиг. 3; фиг. 4). Влиянието на ρ_p е по-слабо при по-големи височини на сечението h . С увеличаване на височината на напречното сечение на елемента h стойностите на $k_{1/r,simpl}$ намаляват.



Фиг. 5. Максимално разстояние между надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на огъване, при $c = 25\text{mm}$; $\sigma_s = 280\text{MPa}$; $h = 300\text{mm}$; $w_{lim,cal} = 0,4\text{mm}$ и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от коефициента на армиране ρ_p и от диаметъра на надлъжната опънна армировка ϕ

Съществено влияние върху стойността на максималното разстояние между опънните надлъжни пръти s_l , изчислено по формула (1) за контрол на пукнатините в стоманобетонните елементи, оказва коефициентът на надлъжно армиране ρ_p в опънната зона на стоманобетонните елементи (фиг. 5; фиг. 6). С увеличаване на коефициента ρ_p значително се увеличава стойността на $s_{l,max}$, което е логично, защото проблеми с пукнатиноустойчивостта обикновено има при елементи, при които площта на опънната армировка е много малка. Затова в опънната зона на стоманобетонните елементи трябва да се предвиди минимално количество надлъжна армировка, която да работи със сцепление с бетона [1; 4; 8]. Тя се поставя за осигуряване на разпределено напукване на елементите с ограничена широчина на пукнатините и за поемане на усилията от принудени деформации, когато те не са разглеждани изрично при изчисляването. При

малки стойности на коефициента на армиране за надлъжната опънна армировка ρ_p , близки до минималния коефициент на армиране ρ_{\min} , влиянието на диаметъра на надлъжните пръти ϕ и на височината на напречното сечение h върху стойността на $s_{l,\max}$ е много малко. При големи стойности на ρ_p диаметърът ϕ и височината h оказват по-забележимо влияние върху стойностите на максималното разстояние между опънните пръти – при по-големи диаметри ϕ е необходимо прътите да се разполагат на по-малко разстояние, за да се ограничи широчината на нормалните пукнатини в опънната зона на елементите.

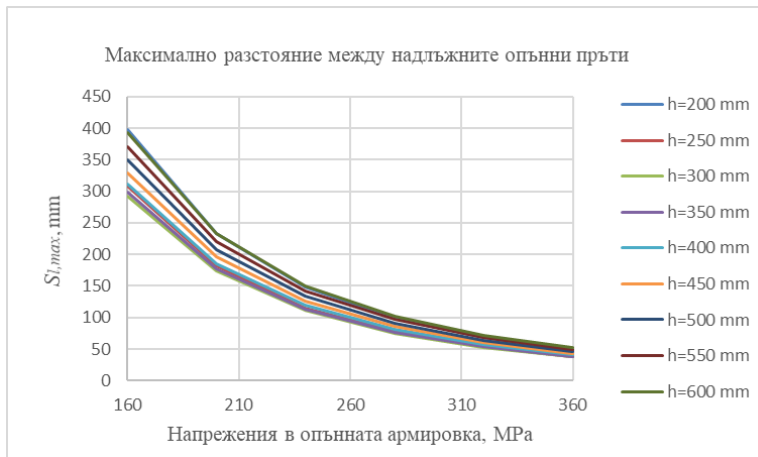


Фиг. 6. Максимално разстояние между надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на огъване, при $c = 25$ mm; $\sigma_s = 320$ MPa; $\phi 25$; $w_{lim,cal} = 0,4$ mm и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от коефициента на армиране ρ_p и от височината на напречното сечение h

Обикновено при големи височини на сечението h се получават по-големи стойности на $s_{l,\max}$, но зависимостта между двете величини е по-сложна, защото височината на напречното сечение на елемента h оказва влияние не само върху стойността на полезната височина на сечението d , но и върху стойностите на коефициентите $k_{fl,simpl}$ и $k_{1/r,simpl}$ (фиг. 1; фиг. 2; фиг. 3).

Огромно влияние върху стойността на максималното разстояние между опънните пръти s_l за контрол на пукнатините оказва напрежението в надлъжната армировка σ_s . На фиг. 7 е дадено изменението на $s_{l,\max}$, изчислено по формула (1), в зависимост от напрежението σ_s и от височината на напречното сечение h при елементи, подложени на огъване, армирани с опънни пръти с диаметър $\phi 25$ (максимално допустим диаметър при бетонно покритие $c = 25$ mm) и при гранична широчина на нормалните пукнатини $w_{lim,cal} = 0,4$ mm. При нарастване на напрежението σ_s от 160 MPa до 360 MPa

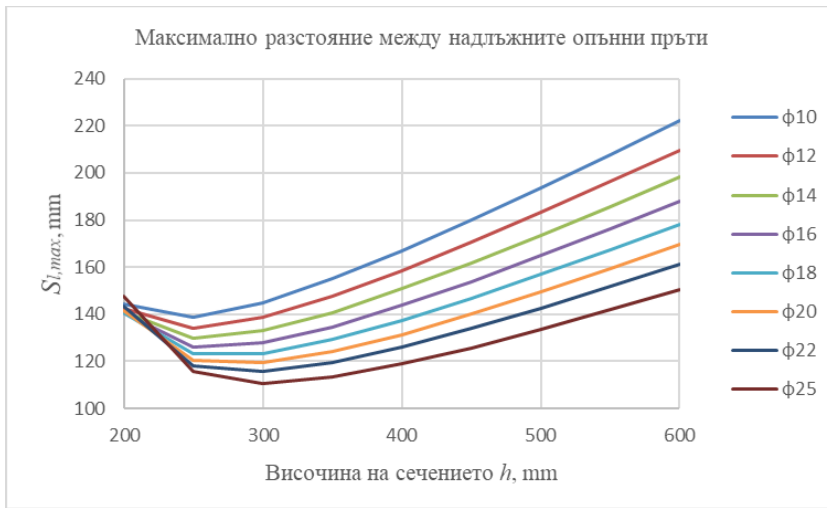
стойностите на $s_{l,max}$ намаляват $7,49 \div 8,2$ пъти в зависимост от височината на сечението h . Влиянието на височината h върху стойността на $s_{l,max}$ при напрежение $\sigma_s = 360$ МПа е пренебрежимо малко. От графиките се вижда, че при напрежение $\sigma_s \geq 280$ МПа и диаметър $\phi 25$ за $s_{l,max}$ се получават малки стойности ($s_{l,max} \leq 10$ mm). При същите стойности на параметрите σ_s и $w_{lim,cal}$ в таблица 7.3N на [1] е дадено по-голямо максимално разстояние между надлъжните опънни пръти: $s_{l,max} = 200$ mm при $\sigma_s = 280$ МПа; $s_{l,max} = 150$ mm при $\sigma_s = 320$ МПа; $s_{l,max} = 100$ mm при $\sigma_s = 360$ МПа. Тези стойности са в пъти по-големи от определените по формула (1) [4].



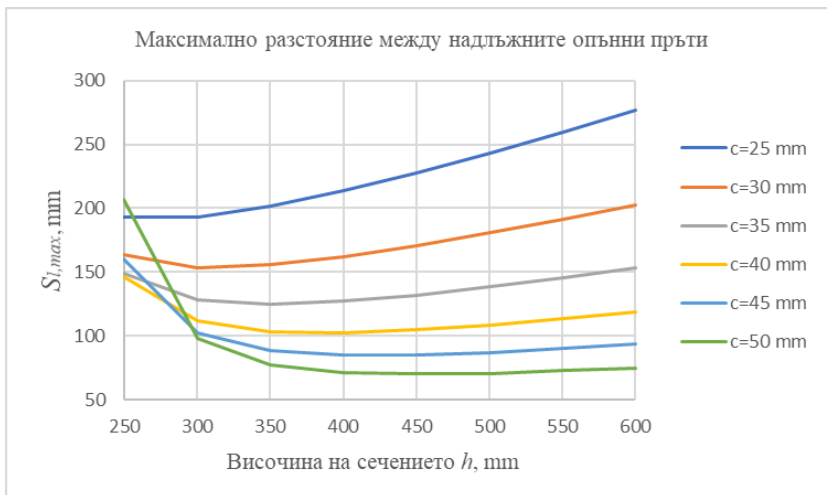
Фиг. 7. Максимално разстояние между надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на огъване, при $c = 25$ mm ; $\rho_p = 0,002$; $\phi 25$; $w_{lim,cal} = 0,4$ mm и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от напрежението в опънната армировка σ_s и от височината на напречното сечение h

На фиг. 8 и фиг. 9 е показано изменението на стойността на максималното разстояние между опънните пръти, изчислено по формула (1), в зависимост от височината на напречното сечение h при различни диаметри на надлъжните опънни пръти ϕ и различни стойности на бетонното покритие на армировката c .

Влиянието на диаметъра на надлъжната опънна армировка ϕ върху стойностите на $s_{l,max}$ е малко при малка височина на напречното сечение (фиг. 8). При по-големи диаметри на прътите се получава по-малко максимално разстояние между тях, осигуряващо контрол на нормалните пукнатини. С увеличаване на бетонното покритие на опънната армировка рязко намалява стойността на $s_{l,max}$ (фиг. 9), тъй като при голяма стойност на c нараства широчината на повърхностните нормални пукнатини. При височина на напречното сечение $h \leq 250(300)$ mm се наблюдава увеличаване на максималното разстояние (фиг. 8; фиг. 9). Това се дължи на факта, че при малка височина на сечението и при голямо бетонно покритие за коефициента $k_{fl,simpl}$ се получават малки стойности, което води до големи стойности за разстоянието s_l , изчислено по формула (1).



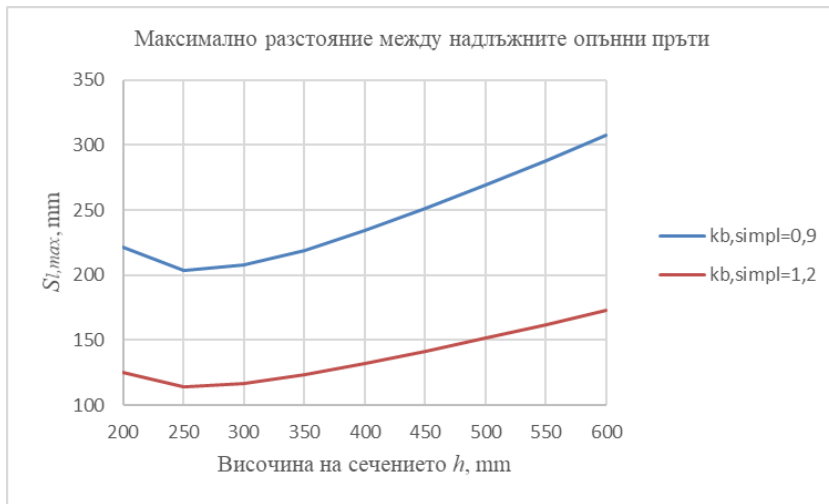
Фиг. 8. Максимално разстояние между надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на огъване, при $c = 25\text{ mm}$; $\sigma_s = 240\text{ MPa}$; $\rho_p = 0,002$; $w_{lim,cal} = 0,4\text{ mm}$ и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от височината на напречното сечение h и от диаметъра на надлъжните опънни пръти ϕ



Фиг. 9. Максимално разстояние между надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на огъване, при $\phi 18$; $\sigma_s = 200\text{ MPa}$; $\rho_p = 0,002$; $w_{lim,cal} = 0,4\text{ mm}$ и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от височината на напречното сечение h и от бетонното покритие на надлъжните опънни пръти c

Позицията на надлъжната опънна армировка при бетонирането е важен фактор при определяне на стойността на максимално разстояние между надлъжните опънни пръти (фиг. 10) [9]. Стойностите на $s_{l,max}$ са по-големи за долната опънна армировка, която

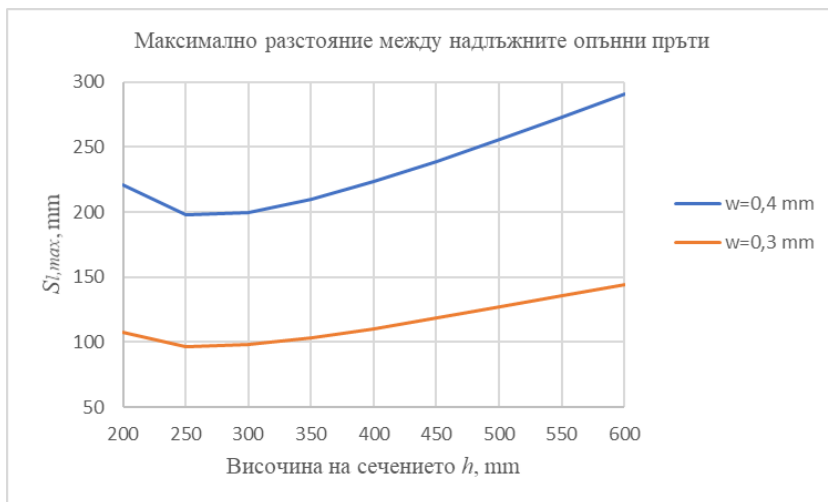
работи при добри условия на сцепление с бетона ($k_{b,simpl} = 0,9$). За горната армировка в стоманобетонни елементи, работеща при недобри (лоши) условия на сцепление с бетона ($k_{b,simpl} = 1,2$), трябва да се влагат по-гъсто разположени пръти (на по-малко разстояние помежду си). Разликата в стойностите на максималното разстояние между надлъжните опънни пръти при недобри (лоши) и добри условия на сцепление е 77,78 % и тя не зависи от други фактори, защото $(1,2/0,9)^2 = 1,7778$. За приетите параметри на фиг. 10 най-ниски стойности за $s_{l,max}$ се получават при височина на напречното сечение $h = 250\text{ mm}$.



Фиг. 10. Максимално разстояние между надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на огъване, при $c = 25\text{ mm}$; $\phi 14$; $\rho_p = 0,002$; $\sigma_s = 200\text{ MPa}$ и $w_{lim,cal} = 0,4\text{ mm}$ в зависимост от височината на напречното сечение h и от позицията на опънните пръти при бетониране

Влиянието на стойността на граничната изчислителна широчина на пукнатините $w_{lim,cal}$ върху максималното разстояние между надлъжните опънни пръти $s_{l,max}$ може да се проследи на фиг. 11. За разгледания случай на елементи, натоварени на огъване, при конкретните стойности за бетонно покритие на армировката ($c = 25\text{ mm}$); напрежение в нея ($\sigma_s = 200\text{ MPa}$); диаметър на прътите ($\phi 16$); коефициент на надлъжно армиране ($\rho_p = 0,002$) и добри условия на сцепление на армировката с бетона ($k_{b,simpl} = 0,9$) получените по формула (1) стойности за максималното разстояние между надлъжните опънни пръти при гранични широчини на пукнатините $w_{lim,cal} = 0,4\text{ mm}$ и при $w_{lim,cal} = 0,3\text{ mm}$ се различават 2,01 ÷ 2,06 пъти (около два пъти, независимо от височината на напречното сечение на елемента), като по-големите стойности съответстват на гранична широчина $w_{lim,cal} = 0,4\text{ mm}$. При същата стойност на напрежението в опънната армировка ($\sigma_s = 200\text{ MPa}$) в таблица 7.3N на [1] са дадени следните стойности за максималното разстояние между надлъжните опънни пръти: $s_{l,max} = 300\text{ mm}$ при

$w_{lim,cal} = 0,4\text{ mm}$; $s_{l,max} = 250\text{ mm}$ при $w_{lim,cal} = 0,3\text{ mm}$, т.е. стойностите при различна гранична ширина на нормалните пукнатини се различават 1,2 пъти и са по-големи от показаните на фиг. 11.



Фиг. 11. Максимално разстояние между надлъжните опънни пръти за ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в елементи, подложени на огъване, при $c = 25\text{ mm}$; $\phi 16$; $\rho_p = 0,002$; $\sigma_s = 200\text{ MPa}$ и $k_{b,simpl} = 0,9$ в зависимост от височината на напречното сечение h и от граничната ширина на пукнатините $w_{lim,cal}$

При анализиране на формула (1) се забелязва, че максималното разстояние между надлъжните опънни пръти не зависи от якостта на опън на бетона в момента на появата на пукнатина, който е основен параметър при изготвяне на таблица 7.3N в действащия настоящем 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 $s_{l,max}$ не се влияят от класа на вложения в елементите бетон.

3. Заключение

В резултат на направените анализи и констатации в настоящата статия могат да се направят следните изводи:

Замяната на таблица 7.3N на [1] с формула за ограничаване на максималното разстояние между надлъжните опънни пръти в [4] не улеснява индиректния контрол на широчината на нормалните пукнатини в опънната зона на стоманобетонните елементи. Формула (1) за определяне на максималното разстояние $s_{l,max}$ е изведена при приемане на опростяващи предпоставки, поради което трябва да се прилага внимателно от проектантите, защото не винаги тези предпоставки са в полза на сигурността. Предпоставките, че надлъжната опънна армировка е разположена само в един ред в

напречното сечение; че се използва само един диаметър на прътите; че разстоянието между центровете на прътите е $s_l \leq 10\phi$ и размерите на ефективната опънна зона на бетона са максимални, не винаги са изпълнени, поради което за $s_{l,max}$ може да се получат стойности, които не гарантират ограничаване на широчината на нормалните пукнатини в опънната зона на стоманобетонните елементи.

Стойността на максималното разстояние между надлъжните опънни пръти зависи от редица параметри. Най-голямо влияние върху $s_{l,max}$ оказва напрежението в опънната армировка σ_s , коефициентът на надлъжно армиране ρ_p , стойността на граничната изчислителна широчина на пукнатините $w_{lim,cal}$ и бетонното покритие на армировъчните пръти c . Изготвените графики показват рязко намаляване на максималното разстояние между надлъжните пръти за контрол на пукнатините при нарастване на напрежението σ_s в опънната армировка при елементи, подложени на огъване, както и обратна тенденция – значително увеличаване на стойностите на максималното разстояние $s_{l,max}$ с увеличаване на коефициента на надлъжно армиране ρ_p . Армирането на стоманобетонните елементи с надлъжна опънна армировка с по-голям коефициент на армиране позволява разполагане на армировъчните пръти на по-голямо разстояние помежду им.

При малки стойности на коефициента на армиране за надлъжната опънна армировка ρ_p , близки до минималния коефициент на армиране ρ_{min} , влиянието на диаметъра на надлъжните пръти ϕ и на височината на напречното сечение h върху стойността на $s_{l,max}$ е много малко.

Обикновено при големи височини на сечението h се получават по-големи стойности на $s_{l,max}$, но зависимостта между двете величини е по-сложна, защото височината на напречното сечение на елемента h оказва влияние върху стойността на полезната височина d и върху стойностите на коефициентите $k_{fl,simpl}$ и $k_{1/r,simpl}$. Влиянието на височината h върху стойността на $s_{l,max}$ при напрежение $\sigma_s = 360\text{MPa}$ е пренебрежимо малко; при малки напрежения σ_s височината на напречното сечение на елемента h оказва по-значимо влияние върху стойността на $s_{l,max}$.

За разгледаните случаи на стоманобетонни елементи, натоварени на огъване, се получават приблизително два пъти разлики в получените по формула (1) стойности за максималното разстояние $s_{l,max}$ при гранични широчини на пукнатините $w_{lim,cal} = 0,4\text{mm}$ и при $w_{lim,cal} = 0,3\text{mm}$ (по-големите стойности на $s_{l,max}$ съответстват на по-голяма гранична широчина на пукнатините). Тази разлика на практика не зависи от височината на напречните сечения.

Новост при определянето на максималното разстояние между надлъжните опънни пръти е отчитане на приноса на позицията на армировъчните пръти при бетониране, т.е. на условията на сцепление на армировката с бетона. Стойностите на $s_{l,max}$ са със 77,78 % по-големи за долната опънна армировка, която работи при добри условия на сцепление с бетона. За горната армировка, работеща при недобри (лоши) условия на сцепление с бетона, трябва да се влагат пръти с по-малко разстояние помежду си с цел контрол на пукнатините по горната повърхност на елементите.

Върху стойностите на максималното разстояние между прътите в опънната зона на сеченията влияние оказват също характерът на напрегнатото състояние на елементите (дали има натискава зона или сеченията са изцяло опънати) и кривината на елемента, която води до увеличаване на широчината на нормалните пукнатини, т.е. $s_{l,max}$ зависи и от стойностите на коефициентите $k_{fl,simpl}$ и $k_{1/r,simpl}$. При малки стойности на $k_{fl,simpl}$ за разстоянието $s_{l,max}$ се получават нереално големи стойности, което означава, че не винаги чрез използване на формула (1) може да се гарантира изисквания контрол на пукнатините. При бетонно покритие $c = h/3,5 - \phi/2$ стойността на този коефициент е $k_{fl,simpl} = 0$ и по формула (1) се получа безкрайно голяма стойност за максималното разстояние между опънните пръти $s_{l,max}$, което е нереалистично.

При едни и същи стойности на параметрите σ_s и $w_{lim,cal}$ стойностите за максималното разстояние между надлъжните опънни пръти, дадени в таблица 7.3N на [1] за ограничаване на пукнатините, са в пъти по-големи от определените по формула (1).

Според проекта на европейски стандарт за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции [4] стойностите на $s_{l,max}$ не се влияят от класа на вложения в елементите бетон, т.е. от якостта на опън на бетона в момента на появата на пукнатина, което е основен параметър при изготвяне на таблица 7.3N в действащия понастоящем стандарт за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции [1].

На базата на направените сравнения и анализи авторът препоръчва вместо формулата за максималното разстояние между надлъжните опънни пръти $s_{l,max}$ или формулата за максималния им диаметър ϕ_{max} , дадени в [4], в проектантската практика контролът на нормалните пукнатини да се извърши чрез директно изчисляване на широчината на пукнатините в стоманобетонните елементи и сравняването ѝ с граничната стойност, което е най-сигурният начин за избягване на отварянето на нормални пукнатини с недопустима широчина.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. BDS EN 1992-1-1:2005 – Evrokod 2: Proektirane na betonni i stomanobetonni konstruktсии. 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. Gueorguieva, M. Maksimalno dopustimo naprezhenie v nadlajната armirovka na stomanobetonni elementi, podlozheni na tsentrichen opan, za control na shirochinata na puknatinitе. Sbornik dokladi ot godishna universitetska nauchna konferentsiya, 05 ÷ 06.06.2025, NVU „Vasil Levski”, tom 4, ISSN 1314-1937, p. 97 – 106.
6. 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>.

7. *Gueorguieva, M.* Efektivna plosht na betona v opannata zona na stomanobetonna elementi. Sbornik dokladi ot godishna universitetska nauchna konferentsiya, 05 ÷ 06.06.2025, NVU „Vasil Levski”, tom 4, ISSN 1314-1937, p. 77 – 85.

8. *Gueorguieva, M.* Minimalna plosht na nadlazhnata armirovka v opannata zona na stomanobetonna elementi za control na puknatinite. Sbornik dokladi ot godishna universitetska nauchna konferentsiya, 05 ÷ 06.06.2025, NVU „Vasil Levski”, tom 4, ISSN 1314-1937, p. 87 – 96.

9. *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.

CONTROL OF CRACK WIDTH IN REINFORCED CONCRETE ELEMENTS BY LIMITING THE DISTANCE BETWEEN LONGITUDINAL BARS 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 distance between the longitudinal reinforcing bars. The main parameters that influence the limit values of the distance between 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