

Rys. 14.14. Odkształcenia w zależności od naprężenia w zbrojeniu

Jeżeli $\sigma_s = \sigma_{sr}$, to

$$\sigma_s = \frac{(A_c + \alpha_e A_s) f_{ct,eff}}{A_s} = \frac{A_c (1 + \alpha_e \rho) f_{ct,eff}}{A_s} = \frac{(1 + \alpha_e \rho) f_{ct,eff}}{\rho}$$

Podstawiając to wyrażenie do (14.8), otrzymuje się

$$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_r = \frac{\sigma_{sr} (1 - k_t)}{E_s}$$

Dla $\sigma_s < \sigma_{sr}$ otrzymuje się

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s}{\sigma_{sr}} \frac{\sigma_{sr} (1 - k_t)}{E_s} = (1 - k_t) \frac{\sigma_s}{E_s}$$

co dla $k_t = 0,4$ prowadzi do wzorów takich jak w normie [N1] (tabl. 14.2).

Uwaga. Dla obciążenia krótkotrwałego ($k_t = 0,6$) wzór właściwy przy małych naprężeniach byłby inny niż w normie (zamiast współczynnika 0,6 powinien pojawić się współczynnik 0,4).

Szerokości rys obliczone w ten sposób porównywano z licznymi wynikami doświadczalnymi [34]. Analizując dystrybuanty maksymalnej szerokości rys, rozpatrywanej jako zmienna losowa, stwierdzono zadowalającą zgodność teorii z badaniami eksperymentalnymi. Jednak, chociaż prac zawierających wyniki pomiarów jest wiele, to niewiele z nich zawiera dane pozwalające na ocenę średniej i maksymalnej szerokości rys. Tak więc, jak stwierdza się w Komentarzu do Eurokodu 2 [34] analiza tego zagadnienia oparto przede wszystkim na wynikach dawno wykonanych badań G. Rehma i H. Rüsch [115], [116] i [117].

Tablica 14.2. ALGORYTM. Obliczanie szerokości rys

Dane: pole przekroju zbrojenia rozciągane A_s , jego średnica ϕ i grubość otulenia c , naprężenie w tym zbrojeniu σ_s w fazie II; uproszczone obliczanie naprężeń przedstawiono w tablicy 13.1; $A_{c,eff}$ – efektywne pole rozciągane (rys. 14.8); moduł sprężystości E_{cm} i efektywna wytrzymałość na rozciąganie betonu $f_{ct,eff}$; współczynniki: $k_t = 0,4$ dla obciążeń długotrwałych lub $k_t = 0,6$ dla obciążeń krótkotrwałych, k_1 i k_2 według p. 2a

1. Różnica średnich odkształceń zbrojenia ϵ_{sm} i betonu między rysami ϵ_{cm}

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}}, \quad \rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}},$$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - \frac{k_t f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s}, \quad \text{lecz nie mniej niż } 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

2a. Jeśli zbrojenie z przyczepnością jest rozmieszczone racjonalnie gęsto (rys. 14.11), to: $k_1 = 0,8$ dla zbrojenia z dobrą przyczepnością, $k_1 = 1,6$ dla prętów gładkich, $k_2 = 0,5$ w przypadku czystego zginania, $k_2 = 1,0$ w przypadku osiowego rozciągania. W przypadku rozciągania mimośrodowego

$$k_2 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2\epsilon_1}$$

We wzorze powyżej ϵ_1 jest większym a ϵ_2 mniejszym z odkształceń na brzegach strefy rozciąganej, wyznaczonej dla przekroju zarysowanego. Maksymalny rozstaw rys

$$s_{r,max} = 3,4c + 0,425 \frac{k_1 k_2 \phi}{\rho_{p,eff}}$$

2b. Jeżeli rozstaw zbrojenia jest za duży (rys. 14.11) albo nie ma zbrojenia, to:

$$s_{r,max} = 1,3 (h - x)$$

3. Szerokość rys

$$w_k = s_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$$

Uwaga. W płytach o grubości nie większej od 200 mm, w których nie występują istotne podłużne siły rozciągające, nie trzeba sprawdzać szerokości rys.

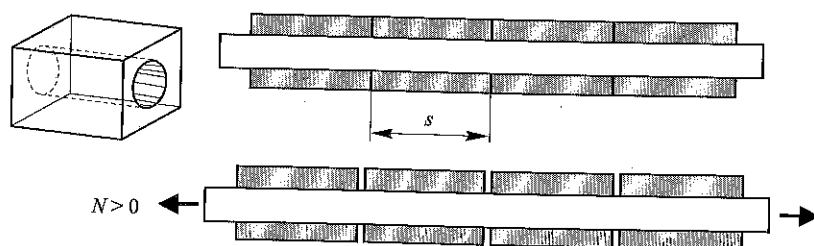
Jeśli pręty zbrojenia są rozmieszczone racjonalnie gęsto (tak, że można stosować wzór (14.4)), to szerokość rys zależy silnie od odkształceń zbrojenia. Ponadto średnica prętów zbrojenia ma wpływ na rozstaw rys, a więc również na szerokość rys.

14.3.6. Szerokość rys

Szerokość rysy jest równa różnicy wydłużeń zbrojenia i betonu na odcinku między sąsiednimi rysami. Na tym spostrzeżeniu opiera się obliczanie szerokości rys.

Bardzo uproszczonym modelem zjawisk związanych z zarysowaniem żelbetu jest pręt stalowy z nanizanymi jednakowymi, sztywnymi (np. drewnianymi) pierścieniami (rys. 4.12). Każdy pierścień jest punktowo przyklejony w środku jego długości do tego pręta. Gdy $N = 0$, nie ma szczelin między pierścieniami. Gdy do pręta przyłożą się siłę $N > 0$, długość pręta wzrośnie i pomiędzy pierścieniami powstaną szczeliny. Szerokość jednej szczeliny wynosi

$$(1 + \varepsilon)s - s = \varepsilon s.$$



Rys. 14.12. Podstawowa idea teorii służącej do obliczania szerokości rys

W elementach żelbetowych długość betonowych „bloków” między rysami zmienia się, ale wydłużenia ich są niewielkie w porównaniu z wydłużeniem zbrojenia. W stalowo-drewnianym modelu cała siła rozciągająca jest przenoszona przez stal. W elemencie żelbetowym cała siła jest przenoszona przez stal tylko w przekroju pokrywającym się z rysą. Między rysami siła jest przekazywana na beton przez przyczepność – część siły rozciągającej przenosi beton. Z tego powodu średnie odkształcenie zbrojenia jest mniejsze niż odkształcenie maksymalne (w przekroju przez rysę), a podłużna sztywność elementu żelbetowego jest większa od sztywności samego zbrojenia $E_s A_s$. Zjawisko to nosi nazwę **tension stiffening** (uszywnienie przy rozciąganiu).

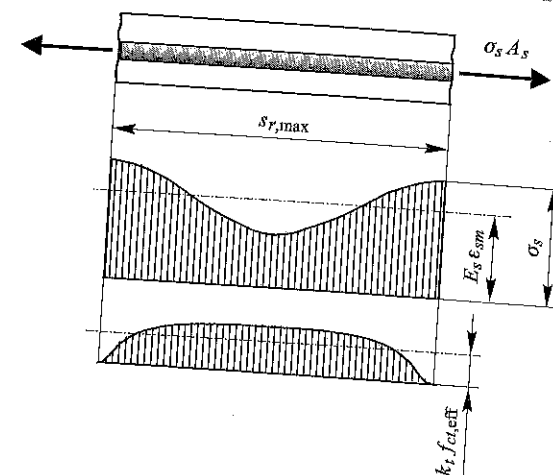
Średnia szerokość rys zależy od średniego rozstawu rys. W projektach należy wziąć pod uwagę losowe wahania szerokości rys – w tym celu do obliczania szerokości rys stosuje się maksymalny rozstaw rys $s_{r,max}$.

Maksymalną szerokość rys oblicza się ze wzoru

$$w_k = s_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (14.6)$$

w którym $s_{r,max}$ oznacza maksymalny rozstaw rys według wzoru (14.4) lub (14.5), ε_{sm} – średnie odkształcenie zbrojenia, a ε_{cm} – średnie odkształcenie betonu między rysami.

Rys. 14.13. Naprężenia na odcinku między dwiema rysami



Rozkład naprężeń w zbrojeniu i w betonie na odcinku między dwiema sąsiednimi rysami przedstawiono na rysunku 14.13.

Obliczenie różnicy wydłużeń zbrojenia i betonu opiera się na założeniu, że średnie naprężenie w betonie wynosi $k_t f_{ct,eff}$. Przyjmuje się, że przy obciążeniu długotrwałym $k_t = 0,4$, a przy obciążeniu krótkotrwałym $k_t = 0,6$. Średnie odkształcenie betonu

$$\varepsilon_{cm} = k_t \frac{f_{ct,eff}}{E_{cm}}.$$

Siła w zbrojeniu wynosi $\sigma_s A_s - k_t f_{ct,eff} A_c$. Zatem średnie odkształcenie zbrojenia

$$\frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{k_t f_{ct,eff} A_c}{E_s A_s} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{k_t f_{ct,eff}}{\rho E_s}. \quad (14.7)$$

Różnica odkształceń betonu i zbrojenia wynosi

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{k_t f_{ct,eff}}{\rho E_s} - \frac{k_t f_{ct,eff}}{E_{cm}} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho} (1 + \alpha_e \rho)}{E_s}. \quad (14.8)$$

Rysunek 14.14 jest graficzną ilustracją wzoru (14.8). W wywodach uzasadniających ten wzór, zakładano, że element jest zarysowany, a więc wzór jest ważny tylko dla $\sigma_s \geq \sigma_{sr}$. Niemniej jednak czasem trzeba obliczyć szerokość rys przy mniejszych naprężeniach w zbrojeniu, gdyż szerokość rys sprawdza się przede wszystkim dla obciążeń długotrwałych. Często siła wywołana przez te obciążenia jest mniejsza od siły rysującej, ale element jest zarysowany, gdyż całe obciążenie (razem z krótkotrwałym) jest większe od obciążenia rysującego. Wtedy szerokość rys można obliczyć, zakładając, że dla $0 < \sigma_s \leq \sigma_{sr}$ wartość $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ jest proporcjonalna do naprężenia, tak jak na rysunku 14.14.