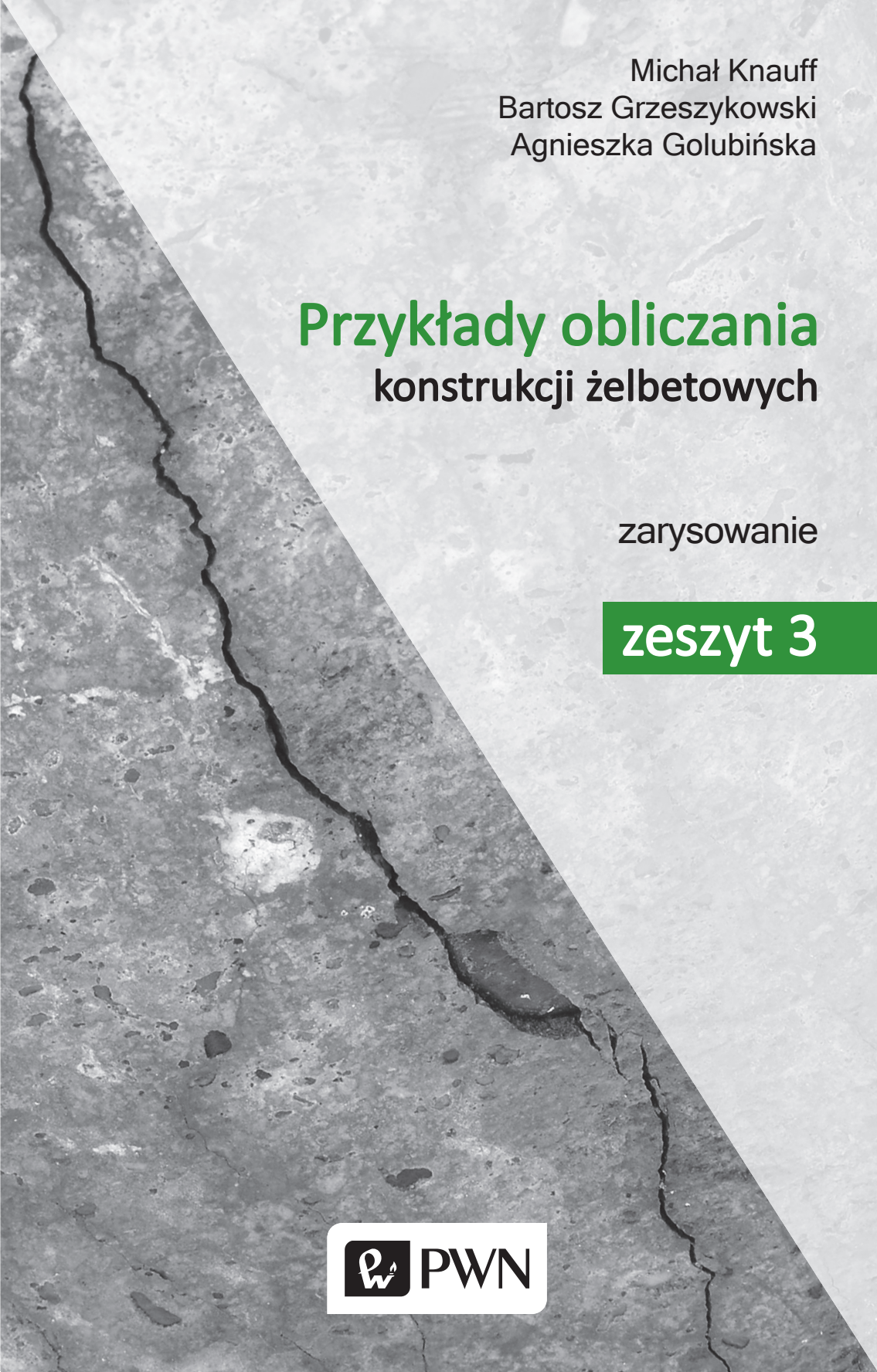
Michał Knauff
Bartosz Grzeszykowski
Agnieszka Golubińska

Przykłady obliczania
konstrukcji żelbetowych

zarysowanie

zeszyt 3



PWN







Stal zbrojeniowa **EPSTAL**
Właściwości i dane do projektowania

Gatunek stali	Średnica nominalna	Nominalna powierzchnia przekroju poprzecznego	Masa nominalna 1 m*
	[mm]	[mm^2]	[kg/m]
B500SP	8	50,27	0,40
	10	78,54	0,62
	12	113,10	0,89
	14	153,94	1,21
	16	201,06	1,58
	20	314,16	2,47
	25	490,87	3,85
	28	615,75	4,83
	32	804,25	6,31
	40	1256,64	9,86

Własności wytrzymałościowe - próba rozciągania			
Opis	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Granica plastyczności	R_e	[MPa]	500 ÷ 625
Stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności	R_m / R_e	[-]	1,15 ÷ 1,35
Minimalne wydłużenie procentowe	A_5	[%]	16,0
Minimalne wydłużenie procentowe całkowite przy maksymalnej sile	A_{gt}	[%]	8,0

* Masa obliczona na podstawie ciężaru objętościowego stali 7850 kg/m^3

Średnica [mm]	Pole przekroju [cm^2]	Przekrój zbrojenia w cm^2/m w zależności od rozstawu prętów				
		10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
8	0,503	5,03	3,35	2,52	2,01	1,68
10	0,785	7,85	5,23	3,93	3,14	2,62
12	1,13	11,30	7,53	5,65	4,52	3,77
14	1,54	15,40	10,27	7,70	6,16	5,13
16	2,01	20,10	13,40	10,05	8,04	6,70
20	3,14	31,40	20,93	15,70	12,56	10,47
25	4,91	49,10	32,73	24,55	19,64	16,37
28	6,16	61,60	41,07	30,80	24,64	20,53
32	8,04	80,40	53,60	40,20	32,16	26,80
40	12,56	125,60	83,73	62,80	50,24	41,87

Średnica [mm]	Przekrój zbrojenia w cm^2 w zależności od liczby prętów									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	0,503	1,01	1,51	2,01	2,52	3,02	3,52	4,02	4,53	5,03
10	0,785	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07	7,85
12	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,78	7,91	9,04	10,17	11,30
14	1,54	3,08	4,62	6,16	7,70	9,24	10,78	12,32	13,86	15,40
16	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,09	20,10
20	3,14	6,28	9,42	12,56	15,70	18,84	21,98	25,12	28,26	31,40
25	4,91	9,82	14,73	19,64	24,55	29,46	34,37	39,28	44,19	49,10
28	6,16	12,32	18,48	24,64	30,80	36,96	43,12	49,28	55,44	61,60
32	8,04	16,08	24,12	32,16	40,20	48,24	56,28	64,32	72,36	80,40
40	12,56	25,12	37,68	50,24	62,80	75,36	87,92	100,48	113,04	125,60

Przykłady obliczania
konstrukcji żelbetowych

Autorzy czują się zobowiązani
do wyrażenia głębokiej wdzięczności
Profesorowi Tadeuszowi Urbanowi,
którego bardzo wnikliwa recenzja
przyczyniła się do usunięcia błędów
i udoskonalenia tekstu.

Michał Knauff
Bartosz Grzeszykowski
Agnieszka Golubińska

Przykłady obliczania
konstrukcji żelbetowych

zarysowanie

zeszyt 3

PWN

Projekt okładki i stron tytułowych: Przemysław Spiechowski

Ilustracja na okładce: Shutterstock/Ivan4es

Wydawca: Karol Zawadzki

Koordynator ds. redakcji: Renata Ziółkowska

Redaktor: Agnieszka Grabarczyk

Produkcja: Mariola Grzywacka

Dział reklamy: Agnieszka Borzęcka (agnieszka.borzecka@pwn.com.pl)

Skład i łamanie: Ewa Szelatyńska, ScanSystem.pl

Recenzent: dr hab. inż. Tadeusz Urban

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2018

ISBN 978-83-01-19633-2

Wydanie I - dodruk 1
Warszawa 2019

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl, reklama@pwn.pl
www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.

Spis treści

Podstawowe oznaczenia IX

Część A. Zasady 1

1. Wstęp 3

2. Wymagania dotyczące zarysowania konstrukcji 8

2.1. Ogólna charakterystyka wymagań dotyczących zarysowania 8
2.2. Uwagi o stosowaniu norm [N1] i [N2] 9
2.3. Wymagania dotyczące budynków 12
2.4. Wymagania dotyczące zbiorników 15

3. Naprężenia w zbrojeniu i miarodajne momenty zginające 20

3.1. Zasady ścisłego obliczania naprężeń metodą klasyczną 20
3.1.1. Przekroje, w których w fazie II istnieje strefa ściskana 20
3.1.2. Przekroje rozciągane z małym mimośrodem 23
3.2. Miarodajne momenty zginające i osie przekroju 24
3.2.1. Osie elementów 24
3.2.2. Miarodajne oddziaływania i wpływ efektów drugiego rzędu 27
3.3. Uproszczone sposoby obliczania naprężeń w zbrojeniu 28

4. Zarysowanie, obliczanie szerokości rys 30

4.1. Stan graniczny zarysowania, moment rysujący i siła rysująca 30
4.1.1. Zasady podstawowe 30
4.1.2. Obliczanie momentu rysującego i siły rysującej 31
4.2. Obliczanie szerokości rys 33

5. Zasady i wzory zastosowane w arkuszach kalkulacyjnych 38

5.1. Zasady ogólne i minimalne zbrojenie 38
5.2. Otulenie c i odległość a 41
5.2.1. Założenia 41
5.2.2. Wymagane wartości c_{nom}, c_{min} i a_{fi} 41
5.3. Uzupełnienia przepisów normy i komentarze 46
5.3.1. Uwagi wstępne 46
5.3.2. Założenia zastosowane w arkuszach kalkulacyjnych 47
5.4. Podstawowe algorytmy zastosowane w arkuszach kalkulacyjnych .. 52

6. Elementy zginane 54

6.1. Zasady sprawdzania elementów zginanych 54

7. Elementy ściskane 58

7.1. Zasady sprawdzania elementów ściskanych 58
7.2. Niezależne od zbrojenia metody sprawdzania SG zarysowania 59
7.2.1. Tablice i wzory 59
7.2.2. Uzasadnienia tablic i wzorów 63
7.3. Sprawdzanie zarysowania w zależności od zbrojenia – elementy niesprężone 65
7.3.1. Miarodajne siły i momenty zginające w przekrojach prostokątnych 65
7.3.2. Przekroje kołowe i pierścieniowe 67
7.3.3. Obliczanie bez stosowania arkusza kalkulacyjnego 69
7.4. Elementy sprężone 71
7.4.1. Zasady ogólne 71
7.4.2. Tablice – wymagania i wzory 72
7.4.3. Opis i uzasadnienia wzorów uzupełniających arkusz kalkulacyjny nr 1 76

8. Elementy rozciągane 78

8.1. Reprezentowanie elementów rozciąganych w arkuszach kalkulacyjnych 78
8.2. Elementy rozciągane z dużym mimośrodem 80
8.3. Elementy rozciągane z małym mimośrodem 80

9. Naprężenia i zarysowania termiczno-skurczowe (TS) 81

9.1. Podstawowe zjawiska 81
9.1.1. Naprężenia wywołane odpływem ciepła hydratacji i skurczem betonu 81
9.1.2. Wpływ rozmiarów elementu na naprężenia TS 85
9.1.3. Dwa terminy krytyczne ze względu na naprężenia TS 86
9.2. Metody ograniczania zarysowania TS 87

9.3. Obliczanie naprężeń TS i szerokości wywołanych przez nie rys 88
9.3.1. Założenia 88
9.3.2. Temperatura i naprężenia własne wywoływane przez hydratację cementu 90
9.3.3. Swobodne odkształcenia termiczno-skurczowe 94
9.3.4. Ogólne zasady obliczania naprężeń wymuszonych 96
9.3.5. Obliczanie naprężeń wymuszonych w ustrojach prętowych . 97
9.3.6. Ogólne zasady obliczania szerokości rys TS 104
9.3.7. Szerokość rys TS w elementach prętowych 104

10. Minimalne zbrojenie ze względu na zarysowanie 109

10.1. Norma [N1] – doktryna i obliczanie minimalnego zbrojenia 109
10.2. Efektywna wytrzymałość $f_{ct,\mathrm{eff}}$ i współczynnik k 113
10.3. Krytyka doktryny normy [N1] 116
10.3.1. Uzupełnienia niemieckie do normy europejskiej 116
10.3.2. Odstępstwa od doktryny w normach europejskich 118
10.3.3. Uwagi o minimach $\min_{cr}$ i $\min_{\mathrm{ULS}}$ 123
10.4. Sprawdzanie minimalnego zbrojenia – trzy poziomy analizy 125
10.5. Podsumowanie 133

11. Opis arkuszy kalkulacyjnych 136

11.1. Zastosowania arkuszy 136
11.2. Ogólne zasady dotyczące arkuszy nr 1, 2 i 3 137
11.3. Uwagi szczegółowe dotyczące arkusza nr 1 141
11.4. Uwagi szczegółowe dotyczące arkusza nr 2 142
11.5. Uwagi szczegółowe dotyczące arkusza nr 3 143
11.6. Opis arkusza nr 4 144

Część B. Przykłady 151

Przykład 1. Miarodajne momenty zginające i osie przekroju 153
Przykład 2. Zastosowanie arkuszy kalkulacyjnych do obliczania naprężeń w betonie i w zbrojeniu 155
Przykład 3. Wyznaczanie wartości c i a według zasad w p. 5.2 Części A 156
Przykład 4. Szerokość rys i minimalne zbrojenie w teowej belce dwuprzęsłowej 158
Przykład 5. Minimalne zbrojenie ścianek przekroju skrzynkowego i środników przekrojów teowych 167
Przykład 6. Belka ze zbrojeniem rozmieszczonym w wielu warstwach 169
Przykład 7. Płyty stropowe z zerową siłą podłużną 174

Przykład 8. Niezależne od zbrojenia sprawdzanie zarysowania w słupach 180
Przykład 9. Szerokość rys w elemencie ściskanym – przekrój prostokątny 183
Przykład 10. Szerokość rys w słupach kilkukondygnacyjnego budynku 189
Przykład 11. Metoda naprężeń liniowych – przekrój kołowy 191
Przykład 12. Szerokość rys w elemencie ściskanym – przekrój pierścieniowy 194
Przykład 13. Zginany element strunobetonowy 196
Przykład 14. Rozciąganie 204
Przykład 15. Zbrojenie ze względu na naprężenia własne 208
Przykład 16. Szerokość rys w ścianach zbiornika prostokątnego .. 215
Przykład 17. Zarysowanie płyty stropowej pod wpływem sił podłużnych wywołanych odkształceniami termiczno-skurczowymi 223
Przykład 18. Zarysowanie płyty fundamentowej pod wpływem sił podłużnych wywołanych odkształceniami termiczno-skurczowymi 234
Przykład 19. Ściana oporowa 243
Przykład 20. Ściana na fundamencie 258

Literatura 265

Podstawowe oznaczenia

Duże litery

A – pole przekroju

A_c – pole przekroju betonu (uwzględnia się tylko przekrój betonu, bez zbrojenia)

$A_{c,\text{eff}}$ – efektywne pole rozciągane

A_{ct} – pole przekroju betonu strefy rozciąganej, powstającej bezpośrednio przed zarysowaniem

A_s, A_{s1},A_{s2}, A_{si} – pole przekroju zgrupowanego zbrojenia, pole przekroju zbrojenia w pierwszej, drugiej, *i*-tej grupie

A_{II} – pole przekroju sprowadzonego w fazie II

$A_{s,\min}$ – minimalne pole przekroju zbrojenia

E_{cm} – średni moduł sprężystości betonu

$E_{c,\text{eff}}$ – efektywny (zależny od pełzania) moduł sprężystości betonu

E_s – moduł sprężystości stali

J_{II} – moment bezwładności przekroju sprowadzonego w fazie II względem osi przechodzącej przez jego środek ciężkości

M – moment zginający względem środka ciężkości przekroju betonu

M_{II} – moment zginający względem środka ciężkości przekroju sprowadzonego w fazie II

M_{cr} – moment rysujący

M_{qp} – moment zginający wywołany *quasi*-stałą (ang. *quasi-permanent*) kombinacją oddziaływań
M_{Ed} – moment zginający wywołany obciążeniem obliczeniowym
M_{ch} – moment zginający wywołany charakterystyczną kombinacją oddziaływań
N – siła podłużna
N_{cr} – siła rysująca
N_{Ed} – siła podłużna wywołana obciążeniem obliczeniowym
N_{qp} – siła podłużna wywołana *quasi*-stałą (ang. *quasi-permanent*) kombinacją oddziaływań
N_{ch} – siła podłużna wywołana charakterystyczną kombinacją oddziaływań
P_c – wypadkowa siła w betonie strefy ściskanej
P – siła
RH – wilgotność względna
S – moment statyczny
T – temperatura
SGN – stan graniczny nośności (ULS – ang. *ultimate limit state*)
SGU – stan graniczny użytkowalności (SLS – ang. *serviceability limit state*)
W_c – wskaźnik wytrzymałości przekroju A_c dla najbardziej rozciąganej krawędzi

Małe litery

a – odległość od wypadkowej siły w grupie prętów zbrojenia do krawędzi przekroju
a_1, a_2 – odległości od krawędzi przekroju do wypadkowej siły w zbrojeniu A_{s1}, A_{s2}
a_{fi} – odległości od wypadkowej siły w grupie prętów zbrojenia do krawędzi przekroju, wymagana ze względu na pożar (w normie [N8] nazywana odległością osiową a)
b – szerokość przekroju
b_f – szerokość półki przekroju teowego
b_{eff} – szerokość części płyty współpracującej z żebrem w przekroju teowym
b_w – szerokość przekroju, grubość środnika w przekroju teowym

c – grubość otulenia zbrojenia
$c_{\min,b}$ – otulenie minimalne ze względu na przyczepność
$c_{\min,\mathrm{dur}}$ – otulenie minimalne ze względu na trwałość
$c_{\min}$ – otulenie minimalne
c_{nom} – otulenie nominalne
d – wysokość użyteczna
e – mimośród
$f_c, f_{ck}, f_{cd}, f_{cm}$ – wytrzymałość betonu na ściskanie: w sensie ogólnym, wartość charakterystyczna, wartość obliczeniowa, wartość średnia
$f_{ct}, f_{ctk}, f_{ctd}, f_{ctm}$ – wytrzymałość betonu na rozciąganie: w sensie ogólnym, wartość charakterystyczna, wartość obliczeniowa, wartość średnia
$f_{ct,\mathrm{eff}}$ – efektywna wytrzymałość betonu na rozciąganie
f_y, f_{yk}, f_{yd} – granica plastyczności stali: w sensie ogólnym, wartość charakterystyczna, wartość obliczeniowa
h – wysokość przekroju, grubość płyty lub ściany
h_0 – miarodajny wymiar przekroju
$h_{c,\mathrm{ef}}$ – wysokość pola $A_{c,\mathrm{eff}}$
h_f – grubość półki przekroju teowego
h_{mod} – wysokość modelowego pręta rozciąganego
k – współczynnik stosowany do uwzględnienia wpływu samozrównoważonych, rozłożonych nieliniowo naprężeń na wytrzymałość na rozciąganie betonu
k_1, k_2, k_t – współczynniki stosowane do obliczania rozstawu i szerokości rys
k_c – bezwymiarowy współczynnik, zależny od rozkładu naprężeń bezpośrednio przed i bezpośrednio po zarysowaniu
k_h – współczynnik zależny od miarodajnego wymiaru przekroju
n – liczba warstw zbrojenia
n_i – liczba prętów w i-tej warstwie zbrojenia
p – obciążenie równomiernie rozłożone
s – rozstaw prętów zbrojenia, rozstaw strzemion
$s_{r,\max}$ – maksymalny rozstaw rys
t – wiek betonu, czas
w_{k1} – graniczna szerokość rys według normy [N10]
w_k – szerokość rys
$w_{\max}$ – graniczna, maksymalna szerokość rys
x – zasięg strefy, w której beton ulega skróceniu

$x_{\min}$ – graniczny zasięg strefy ściskanej według normy [N10]
x_{0I} – środek ciężkości przekroju w fazie I (bez zbrojenia)
x_I – zasięg strefy ściskanej w fazie I (bez zbrojenia)
x_{0II} – środek ciężkości przekroju sprowadzonego w fazie II
x_{II} – zasięg strefy ściskanej w fazie II
y – zasięg strefy rozciąganej
z_i – odległość i-tej warstwy zbrojenia od mocniej ściskanej krawędzi przekroju
z – współrzędna lub (zależnie od kontekstu) ramię sił wewnętrznych
z_0 – współrzędna odmierzana od środka ciężkości przekroju sprowadzonego w fazie II w kierunku mocniej ściskanej krawędzi przekroju

Duże litery greckie

Δc_{dev} – dodatek do otulenia zbrojenia ze względu na odchyłki wykonania
$\Delta\sigma$ – różnica naprężeń
Ω – współczynnik zależny od e/h, stosowany przy sprawdzaniu zarysowania elementów mimośrodowo ściskanych bez zbrojenia

Małe litery greckie

α_e – stosunek modułów sprężystości stali E_s i betonu ($E_{c,\text{eff}}$ albo E_{cm})
ε – odkształcenie
ε_c – odkształcenie betonu
ε_{cm} – średnie odkształcenie betonu
ε_{cs} – odkształcenie skurczowe (ogólnie)
$\varepsilon_{ca}(t)$ – skurcz autogeniczny
$\varepsilon_{cd}(t)$ – skurcz spowodowany wysychaniem
ε_{sm} – średnie odkształcenie zbrojenia
$\varphi(\infty, t_0)$ – końcowy współczynnik pełzania
ρ, ρ_1, ρ_2 – stopień zbrojenia
$\rho_{\min}$ – minimalny stopień zbrojenia

$\rho_{p,\mathrm{eff}}$ – efektywny stopień zbrojenia
σ_c – naprężenie normalne w betonie
σ_s, σ_{si} – naprężenie w zbrojeniu, naprężenie w *i*-tej warstwie zbrojenia
σ_{sr} – naprężenie w zbrojeniu, w przekroju zarysowanym, wywołane momentem rysującym lub siłą rysującą
σ_{wym} – naprężenie wymuszone
$\sigma_{\mathrm{wł}}$ – naprężenie własne

Część A

Zasady

1 Wstęp

Książka *Przykłady obliczania konstrukcji żelbetowych. Zarysowanie* jest zwięzłą monografią dotyczącą sprawdzania konstrukcji żelbetowych ze względu na zarysowanie. Można ją uznać za piątą część serii, do której należą cztery wydane wcześniej przez Wydawnictwo Naukowe PWN książki:

- *Obliczanie konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2* (dwa wydania w 2012 i w 2015 roku),
- *Tablice i wzory do projektowania konstrukcji żelbetowych z przykładami obliczeń* (dwa wydania w 2013 i w 2014 roku),
- *Przykłady obliczania konstrukcji żelbetowych. Zeszyt 1. Budynek ze stropami płytowo-żebrowymi* (2015),
- *Przykłady obliczania konstrukcji żelbetowych. Zeszyt 2. Elementy ściskane* (2016).

Obliczenia związane z zarysowaniem konstrukcji są przedmiotem każdej obszerniejszej książki dotyczącej podstaw konstrukcji żelbetowych. Na pierwszy rzut oka można odnieść wrażenie, że sprawdzanie stanu granicznego (SG) zarysowania polega na podstawianiu wartości do kilku prostych wzorów. Problem jest jednak znacznie szerszy. Zarówno teoria dotycząca zarysowania żelbetu, jak i wynikające z niej przepisy oraz zasady stosowania tych przepisów do zagadnień powstających w praktyce są złożone i nie zawsze całkiem jasne. Dlatego publikacja, która początkowo była pomyślana jako zbiór przykładów obliczeń, wykonywanych za pomocą dołączonych do niej arkuszy kalkulacyjnych, rozrosła się do rozmiarów małej monografii.

Książka *Zarysowanie* składa się z części A i B oraz arkuszy kalkulacyjnych służących do obliczania szerokości rys i minimalnego zbrojenia potrzebnego ze względu na zarysowanie.

W **Części A** zatytułowanej *Zasady* przedstawiono teorię zarysowania i uzasadnienia metod obliczeń użytych w arkuszach i w przykładach. W ostatnim rozdziale tej części podano zwięzłe instrukcje z wyjaśnieniami, które mogą być potrzebne, gdy informacje zawarte w samych arkuszach okażą się niewystarczające.

W **Części B** zatytułowanej *Przykłady* umieszczono dwadzieścia przykładów zastosowania arkuszy kalkulacyjnych do obliczania przekrojów, elementów i konstrukcji, w których zarysowanie może odgrywać istotną rolę. Starano się, żeby przykłady dotyczyły zagadnień, które mogą pojawić się w praktyce, zwłaszcza takich, w których mogą wystąpić pracochłonne obliczenia (wtedy stosowanie arkuszy bardzo usprawnia projektowanie) i takich, w których pojawiają się problemy związane ze stosowaniem teorii i interpretacją przepisów normy. Okazało się, że arkusze i przykłady, które mają obejmować najważniejsze zastosowania, muszą być oparte na podstawach szerszych niż sama norma projektowania konstrukcji z betonu. A zatem konieczne jest uzupełnienie niektórych definicji zawartych w normie (np. definicji efektywnego pola rozciąganego). Dużo uwagi poświęcono interpretacji przepisów dotyczących minimalnego zbrojenia ze względu na zarysowanie. Analiza ogólnych zasad normy i szczególnych przypadków, które często wykraczają poza ramy normy, pozwoliła na sformułowanie zasad będących uogólnieniem teorii zawartej w normie, nadając książce charakter monografii. Niemniej jednak inżynierowie niezainteresowani teorią nie muszą się tym niepokoić. Założono, że Czytelnikiem książki i użytkownikiem arkuszy kalkulacyjnych jest inżynier lub student, który zna podstawy teorii żelbetu na poziomie kursu inżynierskiego wyższej uczelni. Prawie zawsze, zwłaszcza po wykonaniu kilku przykładów, można stosować dołączone do książki arkusze bez dodatkowego studiowania teorii, opierając się wyłącznie na przykładach i krótkich objaśnieniach.

Arkusze kalkulacyjne mogą służyć do obliczania szerokości rys w zwykłych przypadkach, tzn. w zginanych, rozciąganych i ściskanych (z dużym mimośrodem) przekrojach prostokątnych, teowych i dwuteowych (a zatem także w przekrojach skrzynkowych i w przekrojach o kształcie leżącej litery C). Zbrojenie tych przekrojów może być rozmieszczone w wielu warstwach. Arkusze umożliwiają także analizę przekrojów kołowych i pierścieniowych.

W celu pozyskania arkuszy kalkulacyjnych należy wypełnić formularz dostępny na stronie www.dopobrania.pwn.pl w zakładce „Konstrukcje budowlane", wpisując kod i adres e-mail, a następnie potwierdzić e-mail aktywacyjny. Indywidualny kod jest załączony do każdego egzemplarza książki. Po weryfikacji kodu na podany adres mailowy zostaną przesłane pliki oraz hasło, dzięki któremu będzie można odblokować arkusze kalkulacyjne.

Uwaga! Wydawca zastrzega prawo do użytkowania niniejszego oprogramowania wyłącznie przez posiadacza publikacji książkowej. Zwielokrotnianie oraz rozpowszechnianie zawartości, a także korzystanie z plików poza udzieloną licencją jest zabronione, a wobec nieuprawnionych użytkowników mogą zostać wyciągnięte konsekwencje prawne.

Teoria przedstawiona w książce pozwala wnikliwym Czytelnikom sprawdzić, w jaki sposób rozwiązano zagadnienia wykraczające poza zakres normy, zwłaszcza te, w których można stosować różne interpretacje przepisów.

Opracowując przykłady autorzy starali się nie unikać tych problemów, które mogą budzić kontrowersje. Dlatego w Części B oprócz przykładów ilustrujących posługiwanie się arkuszami umieścili także przykłady dotyczące wyznaczania minimalnego zbrojenia ze względu na zarysowanie i przykłady zastosowania teorii do projektowania zbrojenia potrzebnego ze względu na naprężenia termiczno-skurczowe.

Zdaniem autorów, w książce udało się udoskonalić obliczanie szerokości rys i minimalnego zbrojenia. Te udoskonalenia można przedstawić w pięciu punktach.

1. W Części A omówiono, a w arkuszach zastosowano, uzupełnienia do powszechnie stosowanych sposobów kontroli zarysowania. Teoria zawarta w normie nie jest kompletna – obejmuje tylko przypadki występujące najczęściej. W książce uwzględniono wpływ „sztywności strefy ściskanej" na szerokość rys w zakresie szerszym niż wynikający z literalnego odczytania normy, można jednak utrzymywać, że ujęcie zastosowane w książce jest zgodne z normą. W przypadku jednoczesnego zginania i ściskania, a czasem także czystego zginania stosowanie normy może prowadzić do niejasności (np. gdy strefa rozciągana jest mała i w efektywnym polu rozciąganym mieści się tylko część zbrojenia rozciąganego). Autorzy uważają, że przez uzupełnienie przepisów o dodatkowe założenia udało się wprowadzić porządek w te zagadnienia.

2. Arkusze kalkulacyjne służą do obliczania szerokości rys, ale mogą mieć także inne zastosowania. Można je wykorzystać do ścisłego (tzn. zgodnego z teorią naprężeń liniowych) obliczenia naprężeń w elementach żelbetowych w fazie II (także w przekrojach kołowych i pierścieniowych). Inną ich zaletą jest możliwość zastosowania do wykonania najbardziej pracochłonnej części obliczeń dotyczących szerokości rys w przekrojach sprężonych.

3. W książce zastosowano nowe ujęcie zagadnień związanych z minimalnym zbrojeniem potrzebnym ze względu na zarysowanie. Ujęcie tradycyjne polega na stosowaniu wzoru na $A_{s,\min}$ i tablic uzależniających średnicę zbrojenia od naprężenia w stali i od granicznej szerokości rys. Ta metoda ma kilka wad, które szczegółowo omówiono w książce. Nowe ujęcie polega na bezpo-

średnim sprawdzaniu, czy założone zbrojenie minimalne zapewnia wystarczające ograniczenie szerokości rys, które mogą powstać pod wpływem sił wewnętrznych wywołujących pierwsze rysy. Oczywiście, takie ujęcie jest racjonalne tylko wtedy, gdy istnieje możliwość szybkiego obliczania szerokości rys, która w książce jest zapewniona przez arkusze kalkulacyjne. W związku z tym zawiłe przepisy dotyczące przybliżeń stosowanych w celu uproszczenia obliczeń minimalnego zbrojenia przestają być potrzebne. Pozwoliło to na jasne i zwięzłe przedstawienie tego zagadnienia, przy zachowaniu całkowitej zgodności z ogólnymi wymaganiami normy.

4. Aktualna norma [N1] różni się od ciągle jeszcze stosowanej [N2], pomimo że obie te normy są oparte na podobnych podstawach teoretycznych. W książce przedstawiono porównanie tych norm – na tej podstawie stwierdzono, że norma [N1] jest znacznym ulepszeniem [N2]. Duże znaczenie mogą mieć te zasady, które nie są ujęte w postaci wzorów do obliczania szerokości rys. W normie [N1] wymienia się *expressis verbis* kilka przypadków, w których sprawdzanie szerokości rys przez obliczenie (a więc także sprawdzanie minimalnego zbrojenia ze względu na zarysowanie) nie jest konieczne. W normie [N2] nie ma takich przepisów.

W książce omówiono także i zilustrowano przykładem zasady dotyczące sprawdzania szerokości rys w zbiornikach.

5. Duże praktyczne znaczenie mogą mieć zalecane w książce zasady wyznaczania minimalnego zbrojenia ze względu na zarysowanie spowodowane naprężeniami termiczno-skurczowymi (TS). Podstawowy przepis, umieszczony w normach zarówno [N1], jak i [N2], wymaga, żeby minimalne zbrojenie potrzebne ze względu na te zjawiska było zdolne do ograniczenia szerokości rys, które powstaną po przekroczeniu wytrzymałości betonu na rozciąganie, niezależnie od tego, czy ta wytrzymałość jest rzeczywiście osiągana. Stosując tę zasadę do elementów osiowo rozciąganych przez naprężenia TS (np. do ścian oporowych), otrzymuje się bardzo duże ilości zbrojenia, znacznie większe niż stosowano dawniej. Doktryna minimalnego zbrojenia zawarta w normie [N1], prowadząca do bardzo silnego zbrojenia minimalnego, została zanegowana w kilku innych punktach normy i w niemieckim Załączniku Krajowym do tejże normy. W *fib Model Code* doktryna ta nie została umieszczona. W książce, biorąc pod uwagę przepisy niemieckiego Załącznika Krajowego oraz piśmiennictwo dotyczące efektów termiczno-skurczowych, wykazano, że często można zastosować mniej zbrojenia. Sformułowano zasady, które pozwalają niewielkim nakładem pracy obliczyć zbrojenie potrzebne ze względu na efekty TS, tak jak oblicza się zbrojenie na obciążenia bezpośrednie. Na ogół zbrojenie obliczone ze względu na naprężenia TS będzie mniejsze niż zbrojenie wynikające z literalnego stosowania doktryny normy [N1], ale będzie większe od dawniej stosowanego w Polsce zbrojenia,

które czasem okazywało się niewystarczające. Krótkie podsumowanie zaleceń autorów znajduje się na końcu książki. Tu również stosowanie arkuszy kalkulacyjnych ma zasadnicze znaczenie – bez arkuszy trzeba by obliczenia oprzeć na stosowaniu tablicy maksymalnych średnic zbrojenia, co prowadzi do obliczeń dłuższych i mniej przejrzystych. Ponadto w książce wprowadzono klasyfikację metod analizy służących do wyznaczania minimalnego zbrojenia – analiza na poziomie 0 polega na wyznaczaniu tego zbrojenia niezależnie od temperatury i skurczu betonu (tak wyznacza się to zbrojenie w normie), a analizy na poziomie 1 lub 2 wymagają obliczania naprężeń TS.

Szerokie zastosowanie w praktyce mogą uzyskać przede wszystkim te opracowania, które nie są sprzeczne z aktualnymi normami projektowania. Rozszerzenia i uzupełnienia, które dodaliśmy do normy, można uznać za zgodne z podstawowymi zasadami, na których oparta jest dzisiejsza norma europejska.

2 Wymagania dotyczące zarysowania konstrukcji

2.1. Ogólna charakterystyka wymagań dotyczących zarysowania

Obowiązek sprawdzania stanu granicznego zarysowania pojawił się w Polsce po raz pierwszy w normach z lat siedemdziesiątych XX wieku. Poważne zmiany przepisów nastąpiły pod wpływem projektów Eurokodu [N7] i niepublikowanych „draftów" poprzedzających zatwierdzoną przez CEN ostateczną wersję Eurokodu [N6]. Stosowane dzisiaj dwie ostatnie polskie normy [N1] i [N2] są oparte na Eurokodach – norma [N1] na [N6], norma [N2] na wersjach wcześniejszych. Sprawdzanie SG zarysowania występowało także w starszych normach polskich – w pochodzącej z 1999 roku, krótko stosowanej, normie [N3] opierało się na pierwszej wersji Eurokodu [N7], a w normie [N5] na teorii uzgodnionej wśród krajów należących wtedy do RWPG (Rada Wzajemnej Pomocy Gospodarczej – organizacja międzynarodowa państw bloku wschodniego, koordynująca procesy ich integracji gospodarczej).

Warto zauważyć, że chociaż w normach [N1] i [N2] stosuje się podobne założenia ogólne, to zachodzą między nimi istotne różnice. Obszerne porównanie tych norm można znaleźć np. w artykule M. Knauffa [28]. Norma [N1] zawiera więcej informacji niż [N2] i jest istotnym ulepszeniem normy starszej. Dalsze wywody i arkusze kalkulacyjne oparto zatem na normie [N1].

Zawartość normy można podzielić na:

- ogólne zasady dotyczące stanu granicznego zarysowania konstrukcji,
- przepisy, które pozwalają w niektórych przypadkach pomijać sprawdzanie tego stanu granicznego,
- przepisy określające graniczne szerokości rys i wymagania pokrewne (dekompresja) w zależności od klasy ekspozycji,

- teorię i wzory do obliczania szerokości rys,
- zasady wyznaczania minimalnego zbrojenia ze względu na zarysowanie (dla odróżnienia od innych minimów będzie się to zbrojenie oznaczać skrótem $\min_{cr}$).

Ogólne zasady wyrażono w punktach 7.3.1.(1)–7.3.9 normy [N1]. Zarysowanie nie powinno mieć negatywnego wpływu na stan konstrukcji, a wygląd zarysowanej konstrukcji powinien nadawać się do zaakceptowania. Zarysowanie konstrukcji żelbetowych, w których mogą powstawać naprężenia rozciągające wywołane oddziaływaniami bezpośrednimi lub ograniczeniem swobody odkształceń termicznych i skurczowych, uznaje się za zjawisko normalne, którego nie da się uniknąć. Podobne ogólne stwierdzenia występują w normach [N1] i [N2], w zaleceniach *fib* [N22], [N23] i w wielu normach zagranicznych.

Elementy ściskane są znacznie mniej narażone na zarysowanie niż elementy zginane i rozciągane, a więc bardzo często sprawdzenia związane z zarysowaniem mogą być w obliczeniach pomijane. Niemniej jednak, przy ściskaniu z dużym mimośrodem może pojawić się strefa rozciągana. Wtedy, podobnie jak przy projektowaniu belek, należy wykazać, że szerokość rys w tej strefie nie będzie nadmierna.

Stosując wzory przedstawione w normie [N1] lub [N2], można obliczyć **szerokość rys** lub **minimalne pole przekroju zbrojenia potrzebne ze względu na zarysowanie.** Oczywiście, minima omówione w punkcie 9 normy [N1] (*Konstruowanie elementów i reguły szczególne*) należy stosować niezależnie od $\min_{cr}$.

2.2. Uwagi o stosowaniu norm [N1] i [N2]

Jak już wspomniano, normy [N1] i [N2] są oparte na podobnych założeniach ogólnych, ale zachodzą między nimi istotne różnice. Wymagania dotyczące minimalnego zbrojenia ze względu na zarysowanie $\min_{cr}$ pojawiły się w polskich normach w 1999 roku, w normie [N3], w której wprowadzono niektóre przepisy zaczerpnięte z Eurokodu. W porównaniu z zarówno ówczesną, jak i aktualną wersją Eurokodu przepisy te były mocno okrojone – w normie [N3] umieszczono wyłącznie wzór na minimalne pole zbrojenia (w tej książce jest to wzór (10.1)) z okrojonymi (w porównaniu z normą [N1]) objaśnieniami, a pominięto zasady i komentarze normy (trzeba przyznać, że nieco enigmatyczne), które pozwalają niekiedy zmniejszyć $\min_{cr}$ lub w ogóle takiego zbrojenia nie stosować. Również informacje umieszczone w normie [N2] są uboższe niż w [N1]. Dlatego stosowanie co do litery przepisów normy [N2] może

niekiedy prowadzić do przesadnie silnego zbrojenia minimalnego. Należy zatem wykorzystywać możliwości, które stwarza norma najnowsza.

Szczególną uwagę należy poświęcić tym częściom konstrukcji, w których mogą powstać naprężenia rozciągające wywołane oddziaływaniami pośrednimi, a w których zbrojenie ze względu na oddziaływania bezpośrednie nie jest potrzebne. Przykładem może tu być długa ściana, np. ściana oporowa, betonowana na wcześniej stwardniałym fundamencie. Na skutek odpływu ciepła hydratacji i skurczu betonu, z powodu ograniczonej swobody odkształceń ściany, powstają poziome siły rozciągające, które zależą od warunków podparcia i długości ściany – siły te powinny być przeniesione przez zbrojenie poziome.

Podstawowy wzór normy, czyli wzór (10.1), opiera się na założeniu, że te siły rozciągające wywołują zarysowanie elementu. Bezpośrednio przed zarysowaniem maksymalne naprężenie rozciągające jest równe efektywnej wytrzymałości betonu na rozciąganie $f_{ct,\mathrm{eff}}$ – na tej podstawie można obliczyć siłę rysującą lub moment rysujący. Po wystąpieniu rysy beton w przekroju zarysowanym nie przenosi naprężeń rozciągających. Należy zatem zastosować zbrojenie powiązane z betonem przez przyczepność, które wystarczy do przeniesienia sił rozciągających wywołanych przez siłę rysującą lub moment rysujący. Naprężenie w zbrojeniu, które powstanie po zmianie fazy, nie powinno przekraczać charakterystycznej granicy plastyczności (wtedy można uznać, że zarysowanie jest „pod kontrolą"), a jeżeli trzeba ograniczyć szerokość rys, to nie powinno przekraczać naprężenia, przy którym szerokość rys osiąga wartość graniczną (naprężenie to zależy wtedy od średnicy prętów zbrojenia).

Ze wzoru (10.1) otrzymuje się, zwłaszcza w elementach rozciąganych osiowo lub z małym mimośrodem, znaczne ilości zbrojenia, dużo większe niż stosowano w Polsce (np. w ścianach oporowych zaprojektowanych według normy [N17]) przed wprowadzeniem do norm elementów Eurokodu. Im mocniejszy jest beton, tym większe jest wymagane zbrojenie minimalne. W zaleceniach amerykańskich [N15], [N16], omawiających sposoby przeciwdziałania zarysowaniu długich ścian, także wymienia się, między innymi, stosowanie minimalnego zbrojenia (wyznaczanego podobnie jak w normie [N1]) i podkreśla, że do osiągnięcia tym sposobem pożądanego skutku potrzebna jest znaczna ilość stali.

W obliczeniach szerokości rys należy stosować średnią wytrzymałość betonu na rozciąganie f_{ctm}, ale (p. 7.1(2) w [N1]) „*gdy naprężenie rozciągające w betonie nie przekracza* $f_{ct,\mathrm{eff}}$*, to obliczając naprężenia można przyjąć, że przekrój jest niezarysowany. Można przyjąć, że* $f_{ct,\mathrm{eff}} = f_{ctm}$ *lub* $f_{ct,\mathrm{eff}} = f_{ctm,fl}$ *pod warunkiem, że obliczenie minimalnego zbrojenia rozciąganego oparto na tym samym założeniu*". Jak z tego wynika, projektując

przekroje, w których występuje strefa rozciągana, należy rozpatrzyć potrzebę zastosowania minimalnego zbrojenia, które zależy od założonej wytrzymałości betonu na rozciąganie.

Przedstawione w normie zasady wyznaczania minimalnego zbrojenia trudno uznać za zadowalające. W wielu przypadkach wynika z nich potrzeba stosowania bardzo silnego zbrojenia – znacznie silniejszego niż stosowano dawniej. Zapewne w związku z tym w niemieckich postanowieniach krajowych [N18], [N19], [N20] wprowadzono kilka uzupełnień, które umożliwiają zastosowanie zbrojenia nie tak silnego. Uzupełnienia te (omówione w punkcie 10.3.1) zastosowano w metodzie obliczeń zalecanej w książce.

W normie [N1] przepisy dotyczące sprawdzania stanu granicznego zarysowania są znacznie bogatsze, ale mniej kategoryczne niż w normie [N2]. Tak więc, graniczne szerokości rys należy ustalać w zależności od funkcji i rodzaju konstrukcji oraz kosztów, które trzeba ponieść w celu ograniczenia zarysowania. Według punktu 7.3.1(4) w normie [N1] można zezwolić na pojawianie się rys bez podejmowania kroków ograniczających ich szerokość pod warunkiem, że rysy te nie będą szkodliwe dla konstrukcji. Projektując słupy, które będą stale znajdować się we wnętrzu pomieszczeń, gdzie nie będą narażone na szkodliwe oddziaływania, można zatem poprzestać na sprawdzeniu nośności granicznej, zwłaszcza wtedy, gdy powierzchnia betonu nie będzie widoczna. Według normy [N2] takie postępowanie nie było dozwolone.

Stosując polskie normy, w których od lat siedemdziesiątych istniał obowiązek sprawdzania szerokości rys przez obliczenie, konstruktorzy mogli przywyknąć, że takie obliczenia są zawsze konieczne. Ogólne zasady normy [N1] często pozwalają na pominięcie tych obliczeń, a przedstawione w książce proste sposoby sprawdzania elementów, w których strefa rozciągana ma niewielki zasięg, wprowadzają dalsze ułatwienia.

Rozdział normy [N2] dotyczący stanu granicznego zarysowania znacznie ustępuje odpowiedniemu w normie [N1]. Nie ma w nim przepisów, które zezwalają na proste oszacowanie szerokości rys w przypadkach, w których wysokość strefy rozciąganej jest niewielka. Z założenia, że rozstaw rys nie przekracza 130% zasięgu strefy rozciąganej (pominiętego w normie [N2]) wynika kilka racjonalnych, poważnych uproszczeń, które w normie [N2] nie występują. Na tym założeniu oparto w normie [N1] przepis zezwalający na pomijanie obliczania szerokości rys w płytach o grubości nieprzekraczającej 20 cm oraz proste a trafne przepisy dotyczące wyznaczania $\min_{cr}$ (albo pomijania tego zbrojenia) w prostokątnych elementach ściskanych.

Dzięki opracowaniu zasad oceny szerokości rys w elementach obciążonych z niewielkim mimośrodem (czyli z wąską strefą rozciąganą) udało się w książce wyeliminować z obliczeń paradoksalne przypadki, kiedy to podstawianie do wzorów normy prowadziło do wąskich efektywnych pól rozcią-

ganych, w których nie mieściło się rozciągane zbrojenie. Rekomendowana w normie metoda obliczeń traciła wtedy sens fizyczny.

Jeżeli sprawdzenie stanu granicznego przez obliczenie jest konieczne, to stosuje się przepisy, które wymagają, żeby obliczona szerokość rys nie przekraczała wartości granicznej (w elementach sprężonych może być potrzebne także sprawdzenie **warunku dekompresji**).

Wymaganie dotyczące dekompresji w normie [N2] nie występowało. Ponadto, mający podstawowe znaczenie wzór (114) w normie [N2] jest inny niż odpowiadający mu wzór (7.9) w normie [N1], a jak łatwo uzasadnić, to wzór w normie [N1] jest poprawny. Wreszcie w normie [N2] zamieszczono tablicę 12, służącą do wyznaczania maksymalnej średnicy prętów zbrojenia bez towarzyszących jej w Eurokodach zasad modyfikowania średnicy w zależności od grubości otulenia i wytrzymałości betonu na rozciąganie.

Podsumowując, norma [N2] w zastosowaniu do analizy stanu granicznego zarysowania ma tyle braków, że – pomimo zezwolenia Ministra [40] – nie należy jej dziś stosować.

Metody obliczeń rekomendowane w tej książce oparte są na analizie fizycznego sensu zagadnienia i chociaż są one skojarzone z systemem norm opartych na normie [N11], to – zdaniem autorów – mogą być stosowane również w skojarzeniu z przepisami dotyczącymi oddziaływań, pochodzącymi z norm polskich PN ustanowionych przed Eurokodami. *Quasi*-stałą kombinację oddziaływań można wtedy utożsamiać z kombinacją obciążeń długotrwałych według PN. Częsta kombinacja oddziaływań w normach PN nie występuje, a zatem wymagania norm PN-EN odnoszące się do tej kombinacji trzeba zastosować do kombinacji podstawowej według PN.

Wymagania dotyczące zarysowania, które dziś należy spełnić (tabl. 2.1), zależą od klasy ekspozycji i kombinacji oddziaływań. W wymaganiach mogą wystąpić trzy kombinacje oddziaływań: charakterystyczna, częsta i *quasi*-stała.

Według punktu 5.2(3) normy [N1] przy sprawdzaniu stanów granicznych użytkowalności uwzględnianie imperfekcji geometrycznych nie jest wymagane. Tak więc, w obliczeniach momentów zginających, które należy brać pod uwagę przy sprawdzaniu szerokości rys, imperfekcje mogą być pominięte.

2.3. Wymagania dotyczące budynków

Wymagania dotyczące zarysowania i wymaganie **dekompresji** stosuje się w zależności od kombinacji oddziaływań i klasy ekspozycji ze względu na środowisko, w którym ma być użytkowany rozpatrywany element (tabl. 2.1).

Tablica 2.1. Graniczne szerokości rys w_{max} w mm i wymaganie dekompresji według normy [N1]

Klasa ekspozycji	X0, XC1	XC2, XC3, XC4	XD1, XD2, XD3[3)] XS1, XS2, XS3
Elementy sprężone cięgnami z przyczepnością Częsta kombinacja oddziaływań	0,2	0,2[2)]	dekompresja
Elementy żelbetowe i sprężone wyłącznie cięgnami bez przyczepności *Quasi*-stała kombinacja oddziaływań	0,4[1)]	0,3	
[1)] Dla klas X0 i XC1 szerokość rys nie ma wpływu na trwałość i ten limit ma na ogół zapewnić wygląd, który nadaje się do akceptacji. Jeżeli wygląd nie ma znaczenia, to wymagania można złagodzić.			
[2)] Dla tych klas ekspozycji dodatkowo stosuje się wymaganie dekompresji pod wpływem *quasi*-stałej kombinacji oddziaływań. Wymaganie dekompresji jest spełnione wtedy, gdy każde cięgno (kanał kablowy) jest otoczone warstwą betonu ściskanego o grubości co najmniej 25 mm.			
[3)] W przypadku środowiska klasy XD3 może być konieczne podjęcie specjalnych kroków, w zależności od właściwości agresywnych czynników.			

Wymagania dotyczące konstrukcji żelbetowych i konstrukcji, które są sprężone wyłącznie cięgnami bez przyczepności, są bardzo proste i podobnie jak w normie [N2] dotyczą tylko szerokości rys pod wpływem ***quasi*-stałej kombinacji oddziaływań** (w starszych normach ta kombinacja występowała pod polską nazwą **kombinacja obciążeń długotrwałych**). Szerokości rys są w normie [N1] ograniczone łagodniej niż w normie [N2], ale istnieje dziś odrębna norma [N10] dotycząca zbiorników na ciecze, wprowadzająca ograniczenia inne niż w [N1].

W wymaganiach dotyczących konstrukcji sprężonych cięgnami mającymi przyczepność do betonu występują trzy kombinacje oddziaływań w stanie granicznym użytkowalności: charakterystyczna, częsta i *quasi*-stała. Do oznaczania sił podłużnych i momentów zginających wywołanych przez te kombinacje będzie się stosować indeksy będące skrótami angielskich nazw oddziaływań: *ch* (od ang. *characteristic*) dla kombinacji charakterystycznej, *fr* (od ang. *frequent*) dla częstej i *qp* (od ang. *quasi-permanent*) dla *quasi*-stałej.

Takie kombinacje nie występowały w starszych polskich normach oddziaływań [N12]. Co do zasady (nie biorąc pod uwagę różnic w wartościach poszczególnych oddziaływań), jak już wspomniano, kombinację *quasi*-stałą