

Jan Żmuda

# PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH

cz.1 Dźwigary kratownicowe,  
słupy, ramownice

The logo for PWN (Państwowe Wydawnictwo Naukowe) is located at the bottom center of the cover. It consists of a blue square containing a white stylized 'P' and 'W' with a small flame-like element above the 'W', followed by the letters 'PWN' in a bold, white, sans-serif font.

 PWN

# **PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH**



Jan Żmuda

# **PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH**

**cz.1 Dźwigary kratownicowe,  
słupy, ramownice**

Projekt okładki i stron tytułowych: **Aleksandra Regulska**

Ilustracja na okładce: **gyn9037/Shutterstock**

Rysunki: **Wiesław Kotyla**

Wydawca: **Karol Zawadzki**

Redaktor: **Agnieszka Grabarczyk**

Produkcja: **Mariola Grzywacka**

Łamanie: **Grafini, Brwinów**

**Wydanie publikacji dofinansowane przez Opolską Okręgową Izbę  
Inżynierów Budownictwa**

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](http://www.legalnakultura.pl)

*Polska Izba Książki*

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA  
Warszawa 2016

ISBN

978-83-01-18482-7 t. I

978-83-01-18483-4 t. I i t. II

Wydanie I

Wydawnictwo Naukowe PWN SA  
ul. ul. G. Daimlera 2, 02-460 Warszawa  
tel. 22 69 54 321; faks 22 69 54 288  
e-mail: [pwn@pwn.com.pl](mailto:pwn@pwn.com.pl); [www.pwn.pl](http://www.pwn.pl)

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

# Spis treści

<b>Przedmowa</b> . . . . .	XI
<b>Podstawowe oznaczenia</b> . . . . .	XIII
<b>1. Stal, produkcja, właściwości, wyroby</b> . . . . .	1
1.1. Zarys produkcji stali . . . . .	1
1.1.1. Stal a żelazo . . . . .	1
1.1.2. Produkcja stali i żeliwa . . . . .	1
1.1.3. Stal – produkt finalny . . . . .	2
1.2. Właściwości stali konstrukcyjnych . . . . .	2
1.2.1. Wartości obliczeniowe stałych materiałowych . . . . .	2
1.2.2. Właściwości mechaniczne . . . . .	2
1.2.2.1. Wytrzymałość stali . . . . .	3
1.2.2.2. Ciągliwość stali . . . . .	4
1.2.2.3. Udarność stali – odporność na kruche pękanie . . . . .	4
1.2.2.4. Odporność na pękanie rozwarstwiającej . . . . .	5
1.2.3. Spawalność stali . . . . .	5
1.3. Symbole i ich układy charakteryzujące gatunki stali oraz ich właściwości mechaniczne, technologiczne i użytkowe . . . . .	6
1.4. Cechy mechaniczne, skład chemiczny stali . . . . .	8
1.5. Stalowe wyroby hutnicze . . . . .	8
1.6. Właściwości mechaniczne stali w różnych temperaturach . . . . .	10
1.6.1. Temperatury klimatyczne . . . . .	10
1.6.2. Temperatury pożarowe . . . . .	11
1.6.3. Zabezpieczenia zwiększające odporność ogniową elementów stalowych . . . . .	12
1.7. Korozja stali . . . . .	13
1.7.1. Rodzaje korozji . . . . .	13
1.7.2. Ochrona przed korozją . . . . .	15
1.7.3. Powłoki antykorozyjne . . . . .	16
1.8. Charakterystyka łączników . . . . .	17
1.9. Spoiny, technologie spawania . . . . .	17
1.9.1. Pojęcie spoin . . . . .	17

1.9.2. Spawanie elektryczne . . . . .	18
1.9.3. Spawanie gazowe . . . . .	19
1.9.4. Rodzaje złącz spawanych i spoin . . . . .	20
1.9.5. Spoiny czołowe, nazwy, wymiary . . . . .	20
1.9.6. Spoiny pachwinowe, kształty, wymiary . . . . .	24
1.9.7. Spoiny otworowe . . . . .	28
1.9.8. Spoiny szerokobruzdowe . . . . .	28
1.9.9. Oznaczenia spoin na rysunkach konstrukcyjnych . . . . .	29
1.10. Śruby . . . . .	32
1.10.1. Rodzaje i klasy śrub . . . . .	32
1.10.2. Cechy śrub . . . . .	33
1.10.3. Oznaczenia śrub na rysunkach konstrukcyjnych . . . . .	36
1.11. Elementy wysyłkowe . . . . .	37
<b>2. Podstawy projektowania . . . . .</b>	<b>39</b>
2.1. Wymagania niezawodności, jakość i kontrola według PN-EN-1990 . . . . .	39
2.1.1. Wymagania niezawodności – stany graniczne . . . . .	39
2.1.2. Poziomy niezawodności . . . . .	41
2.2. Założenia projektowania i wymiarowania . . . . .	41
2.3. Obciążenia, współczynniki, kombinacje obciążeń . . . . .	42
2.3.1. Klasyfikacja obciążeń . . . . .	42
2.3.2. Obciążenia stałe i użytkowe . . . . .	42
2.3.3. Obciążenia klimatyczne . . . . .	43
2.3.4. Obciążenia wyjątkowe . . . . .	43
2.3.5. Kombinacje oddziaływań w stanach granicznych nośności (STR) i użytkowości . . . . .	44
2.4. Klasyfikacja przekrojów poprzecznych . . . . .	47
2.5. Efekt szerokiego pasa . . . . .	51
<b>3. Elementy rozciągane . . . . .</b>	<b>53</b>
3.1. Rodzaje i zastosowania . . . . .	53
3.2. Elementy sztywne . . . . .	53
3.2.1. Przekroje poprzeczne . . . . .	53
3.2.2. Nośność elementów rozciąganych . . . . .	54
3.3. Podatne elementy rozciągane (ciągnia i liny) . . . . .	60
3.3.1. Zastosowanie oraz rodzaje ciągnien i lin . . . . .	60
3.3.2. Nośność ciągnien i lin . . . . .	62
3.3.3. Zakotwienie ciągnien . . . . .	63
3.4. Elementy rozciągane dźwigarów kratownicowych . . . . .	64
3.4.1. Zasady doboru kształtów . . . . .	64
3.4.2. Warunki nośności . . . . .	64
<b>4. Elementy ściskane, wyboczenie . . . . .</b>	<b>66</b>
4.1. Uwagi ogólne . . . . .	66
4.2. Istota wyboczenia elementu ściskanego . . . . .	66

4.3. Teoria wyboczenia . . . . .	67
4.4. Długości wyboczeniowe wyizolowanych idealnych prętów . . . . .	69
4.5. Nośność elementów osiowo ściskanych . . . . .	70
4.5.1. Warunki nośności . . . . .	70
4.5.2. Krzywe wyboczenia giętnego . . . . .	71
4.6. Przekroje efektywne ścianek klasy 4 ściskanych elementów . . . . .	73
4.6.1. Zjawisko miejscowej utraty stateczności . . . . .	73
4.6.2. Pola efektywne . . . . .	75
4.7. Projektowanie ściskanych prętów dźwigarów kratownicowych . . . . .	80
4.7.1. Rodzaje przekrojów prętów . . . . .	80
4.7.2. Dobór przekrojów prętów ściskanych kratownicy . . . . .	82
4.7.3. Długości wyboczeniowe prętów kratownic . . . . .	82
4.7.4. Ściskane pręty proste . . . . .	86
4.7.5. Pręty złożone bliskogałęziowe . . . . .	86
4.8. Elementy ściskane złożone z przewiązkami lub skratowane . . . . .	91
4.8.1. Kształtowanie cech geometrycznych . . . . .	91
4.8.2. Elementy ściskane z przewiązkami . . . . .	93
4.8.3. Elementy ściskane ze skratowaniem . . . . .	94
4.8.4. Siły wewnętrzne w pasach złożonego elementu ściskanego z uwzględnieniem imperfekcji i teorii II rzędu . . . . .	94
4.8.5. Nośność ściskanych prętów złożonych . . . . .	98
4.9. Pręty o przekrojach otwartych monosymetrycznych . . . . .	100
<b>5. Połączenia elementów rozciąganych i ściskanych . . . . .</b>	<b>108</b>
5.1. Złącza ze spoinami czołowymi . . . . .	108
5.2. Złącza zakładkowe ze spoinami pachwinowymi . . . . .	109
5.2.1. Założenia do obliczeń, wytrzymałość spoiny na ścinanie . . . . .	109
5.2.2. Nośność połączeń zakładkowych elementów rozciąganych lub ściskanych . . . . .	110
5.3. Złącza teowe, krzyżowe ze spoinami pachwinowymi . . . . .	122
5.4. Połączenia śrubowe zakładkowe . . . . .	124
5.4.1. Rodzaje i kategorie połączeń . . . . .	124
5.4.2. Nośność obliczeniowa śrub i nitów na ścinanie i docisk . . . . .	128
5.4.3. Nośność obliczeniowa śrub sprężanych w ciernych połączeniach zakładkowych . . . . .	131
5.4.4. Projektowanie połączeń zakładkowych . . . . .	133
5.4.5. Połączenia zakładkowe z nierównomiernie obciążonymi łącznikami . . . . .	148
<b>6. Dźwigary kratownicowe . . . . .</b>	<b>152</b>
6.1. Rodzaje i kształty . . . . .	152
6.2. Dobór kształtu i ogólnych wymiarów kratownicy . . . . .	158
6.3. Założenia, obciążenia, siły wewnętrzne . . . . .	160
6.4. Ugięcia dźwigarów kratownicowych . . . . .	161
6.5. Projektowanie węzłów i blach węzłowych . . . . .	163



6.5.1. Zasady kształtowania . . . . .	163
6.5.2. Zalecenia do obliczania węzłów . . . . .	165
6.6. Kratownice z kształtowników rurowych . . . . .	176
6.6.1. Uwagi ogólne . . . . .	176
6.6.2. Warunki projektowania kratownic z rur . . . . .	177
6.6.3. Modele obliczeniowe kształtowników rurowych . . . . .	179
6.6.4. Nośności obliczeniowe prętów kratownic z rur . . . . .	180
6.6.5. Nośność spoin i węzłów . . . . .	182
6.7. Stężenia kratownicowe więzarów dachowych . . . . .	188
6.7.1. Rodzaje stężeń kratownicowych . . . . .	188
6.7.2. Stężenie połączeniowe poprzeczne . . . . .	190
6.7.3. Stężenie połączeniowe podłużne . . . . .	197
6.7.4. Stężenia pionowe podłużne więzarów dachowych . . . . .	199
<b>7. Słupy stalowe . . . . .</b>	<b>201</b>
7.1. Konstrukcja, zastosowanie, schematy statyczne . . . . .	201
7.2. Przekroje poprzeczne trzonów słupów . . . . .	204
7.3. Długości wybojeniowe słupów . . . . .	207
7.3.1. Długości wybojeniowe słupów w płaszczyźnie ramy lub ramownicy . . . . .	207
7.3.2. Długości wybojeniowe słupów w kierunku prostym do płaszczyzny układu słupowo-ryglowego (ramownicy) . . . . .	212
7.4. Słupy o przekrojach bisymetrycznych . . . . .	212
7.4.1. Zasady obliczania . . . . .	212
7.5. Słupy o przekrojach pełnościennych obciążonych siłami osiowymi i momentami zginającymi . . . . .	219
7.6. Słupy złożone, wielogałęziowe . . . . .	227
7.7. Podpory kratownicowe – wahacze . . . . .	233
7.8. Głowice słupów . . . . .	238
7.8.1. Zasady konstruowania głowic . . . . .	238
7.8.2. Głowica słupa z płaską blachą poziomą – bez płytki centrującej . . . . .	238
7.8.3. Głowica z płaską płytką centrującą . . . . .	240
7.8.4. Głowica ze styczną płytką centrującą . . . . .	240
7.8.5. Cechy geometryczne i wymiarowanie elementów konstrukcyjnych głowic słupów . . . . .	242
7.9. Styki słupów . . . . .	247
7.9.1. Zasady konstruowania . . . . .	247
7.10. Stopy stalowe słupów . . . . .	253
7.10.1. Konstrukcje stóp . . . . .	253
7.10.2. Wytrzymałość obliczeniowa na docisk miejscowy betonu . . . . .	256
7.10.3. Ogólne zasady obliczenia nośności elementów konstrukcyjnych stóp stalowych słupów . . . . .	257
7.10.4. Stopa przegubowa słupa obciążonego siłą osiową, bez żeber usztywniających . . . . .	259

7.10.5. Stopa sztywna słupa bez żeber usztywniających . . . . .	260
7.10.6. Stopa sztywna uźebrowana obciążona osiową siłą ściskającą i momentem zginającym . . . . .	267
7.10.7. Sztywność obrotowa początkowa stopy . . . . .	286
7.10.8. Zakotwienia śrub fundamentowych . . . . .	288
<b>8. Poprzeczne układy nośne słupowo-ryglowe . . . . .</b>	<b>291</b>
8.1. Zastosowanie . . . . .	291
8.2. Stężenia słupów poprzecznych układów nośnych . . . . .	291
8.2.1. Stężenia międzysłupowe pionowe . . . . .	292
8.2.2. Stężenia hal lekkich . . . . .	292
8.2.3. Stężenia podłużne hal przemysłowych . . . . .	294
8.2.4. Stężenia poziome i pionowe ścian szczytowych . . . . .	295
8.3. Geometryczne imperfekcje globalne i lokalne . . . . .	297
8.3.1. Imperfekcje globalne . . . . .	298
8.3.2. Imperfekcje lokalne . . . . .	300
8.4. Analiza statyczna I i II rzędu . . . . .	301
8.5. Ocena wrażliwości na efekty II rzędu słupów i układów słupowo-ryglowych . . . . .	304
8.6. Przybliżone metody obliczania sił wewnętrznych w poprzecznych układach słupowo-ryglowych . . . . .	308
8.6.1. Ogólne zasady . . . . .	308
8.6.2. Określenie przybliżonych wartości podporowych metodą portalową (ognisk) . . . . .	308
8.6.3. Wyznaczanie przybliżonych wartości sił podporowych i przekrojowych metodą zastępczych schematów statycznych . . . . .	310
8.6.4. Wielkości podporowe układów poprzecznych o przegubowym połączeniu rygła ze słupami . . . . .	317
<b>Literatura . . . . .</b>	<b>324</b>
Książki i artykuły . . . . .	324
Normy . . . . .	325



# Przedmowa

Niniejsza książka *Projektowanie konstrukcji stalowych* jest znowelizowaną wersją dwóch poprzednich wydań publikacji *Podstawy projektowania konstrukcji metalowych*. Zawiera ona dużo zmian, w stosunku do poprzednich wydań związanych przede wszystkim z wprowadzeniem nowych norm Eurokodu 3, w tym norm projektowania konstrukcji stalowych PN-EN 1993-1, oraz uwzględnieniem nowych osiągnięć inżynierskich i badawczo-wdrożeniowych.

Zakres opracowania jest dostosowany do programu przedmiotów „Konstrukcje metalowe 1 i 2” wykładanych na dwu kolejnych semestrach studiów I stopnia na kierunku budownictwo. Stąd też treść opracowania podzielono na dwie części (t. 1 i 2). Pierwsza umożliwi studentom pierwszego semestru zaprojektowanie układu poprzecznego słupowo-ryglowego hali lekkiej z ryglami kratownicowymi i ze słupami pełnościennymi bądź złożonymi, druga zaś będzie podstawą do zaprojektowania w drugim semestrze budynku ze stalowymi ramami pełnościennymi i ze stropem z rusztem stalowym podpieranym przez słupy o przekrojach złożonych.

W proponowanym wydaniu podjęto próbę syntetycznego ujęcia bardzo obszer-nych i rozproszonych postanowień Eurokodów, zwłaszcza Eurokodu 3 i ich zastosowania do wymiarowania i projektowania podstawowych stalowych elementów konstrukcyjnych (prętów ściskanych, rozciąganych, słupów, belek, węzłów) i ustrojów konstrukcyjnych (dźwigarów kratownicowych, układów poprzecznych słupowo-ryglowych, ram).

W przypadku projektowania wielu rozwiązań konstrukcyjnych (np. dźwigarów pełnościennych ze ściankami klasy 4, ram obliczanych według teorii II rzędu) student lub projektant będzie zachęcany do korzystania ze wspomagania komputerowego, jeśli w pełni będzie wdrażać postanowienia pakietu norm Eurokod. Jednak do weryfikacji poprawności wyników obliczeń komputerowych niezbędna będzie podstawowa znajomość postanowień Eurokodów, a także wiedza z zakresu wytrzymałości materiałów i mechaniki budowli.

Opracowanie ma być rodzajem przewodnika w procesie projektowania podstawowych elementów konstrukcyjnych i bardziej złożonych zespołów nośnych stalo-

wych szkieletów konstrukcyjnych, ułatwiającym projektantom i ewentualnie wykonawcom konstrukcji prawidłową interpretację, zastosowanie i praktyczne zrozumienie zasad konstrukcyjnych przyjętych w postanowieniach Eurokodów.

Podstawy teoretyczne wyjaśniające zasady projektowania, w tym wymiarowanie i konstruowanie prostych lub bardziej złożonych stalowych elementów i ustrojów konstrukcyjnych, poparto licznymi przykładami obliczeniowymi ze szkicami ich rozwiązań konstrukcyjnych.

Książka jest przeznaczona zarówno dla studentów wydziałów budownictwa (lądowego, wodnego, dróg i mostów, kolejowego) i wydziałów pokrewnych (mechanicznych, rolniczych) wyższych uczelni technicznych, jak i dla projektantów konstrukcji stalowych.

Projektanci konstrukcji budowlanych – dotychczas opracowujący projekty na podstawie „starych” norm, w tym norm PN-B/90-03260 i innych pokrewnych – stają wobec konieczności praktycznego przyswojenia sobie nowych zasad projektowania w zakresie zarówno zestawienia obciążeń, weryfikacji niezawodności metodą stanów granicznych i współczynników częściowych, jak i wymiarowania elementów konstrukcyjnych.

Autor pragnie podziękować prof. dr. hab. inż. Antoniemu Biegusowi za opracowanie opinii o celowości wydania tej książki i pozytywną ocenę jej walorów zarówno dydaktycznych, jak i aplikacyjnych.

Bardzo dziękuję Pani mgr Elżbiecie Kuźniar za opracowanie komputerowego wydruku, a Panu mgr. Wiesławowi Kotyli za staranne wykonanie dużej liczby rysunków poglądowych schematycznych i konstrukcyjnych.