

Jan Żmuda

PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH

cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice



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

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; www.pwn.pl

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

Spis treści

Przedmowa	XI
Podstawowe oznaczenia	XIII
1. Stal, produkcja, właściwości, wyroby	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 rozwarstwiający	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
2. Podstawy projektowania	39
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
3. Elementy rozciągane	53
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 ciągnięć i lin	60
3.3.2. Nośność ciągnięć i lin	62
3.3.3. Zakotwienie ciągnięć	63
3.4. Elementy rozciągane dźwigarów kratownicowych	64
3.4.1. Zasady doboru kształtów	64
3.4.2. Warunki nośności	64
4. Elementy ściskane, wyboczenie	66
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
5. Połączenia elementów rozciąganych i ściskanych	108
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 ści- skanych	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 za- kładkowych	131
5.4.4. Projektowanie połączeń zakładkowych	133
5.4.5. Połączenia zakładkowe z nierównomiernie obciążonymi łączni- kami	148
6. Dźwigary kratownicowe	152
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 wiązarów dachowych	188
6.7.1. Rodzaje stężeń kratownicowych	188
6.7.2. Stężenie połączowe poprzeczne	190
6.7.3. Stężenie połączowe podłużne	197
6.7.4. Stężenia pionowe podłużne wiązarów dachowych	199
7. Słupy stalowe	201
7.1. Konstrukcja, zastosowanie, schematy statyczne	201
7.2. Przekroje poprzeczne trzonów słupów	204
7.3. Długości wyboczeniowe słupów	207
7.3.1. Długości wyboczeniowe słupów w płaszczyźnie ramy lub ramownicy	207
7.3.2. Długości wyboczeniowe 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
8. Poprzeczne układy nośne słupowo-ryglowe	291
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 ryglu ze słupami	317
Literatura	324
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.

Podstawowe oznaczenia

Duże litery łacińskie

- A – pole przekroju poprzecznego brutto
- A_f – pole przekroju pasa brutto
- A_w – pole przekroju środka brutto
- A_v – pole przekroju środka przy ścinaniu
- A_{eff} – pole przekroju efektywnego (przy niestateczności miejscowej i efekcie szerokiego pasa)
- $A_{eff,f}$ – pole współpracujące części przekroju pasa
- $A_{eff,w,c}$ – pole współpracującej części strefy ściskanej środka
- $A_{c,eff,loc}$ – pole przekroju współpracującego subpanelu
- A_{sl} – pola przekroju żeber podłużnych
- A_{st} – pole przekroju żebra poprzecznego
- A_{ch} – pole przekroju gałęzi słupa złożonego
- A_d – pole przekroju krzyżulca
- $B_{x,Ed}$ – bimoment
- $B_{w,Rk}$ – obliczeniowa nośność przekroju od bimomentu
- $C_{v,R,k}$ – sztywność obrotowa związana z poszyciem przy założeniu sztywnych połączeń
- $C_{v,C,k}$ – sztywność obrotowa związana z połączeniami poszycia z belką
- $C_{v,D,k}$ – sztywność obrotowa związana z odkształceniami dystorsyjnymi przekroju belki, gdy pas ściskany jest swobodny
- C_m – współczynnik modyfikacji uwzględniający liniową zmienność momentu
- E_d – efekt oddziaływań kombinacji obciążeń
- E – moduł sprężystości podłużnej
- $F_{\phi,k}$ – wartość charakterystyczna obciążenia nominalnego
- F_{Ed} – obliczeniowe obciążenie skupione
- $F_{z,Ed}$ – wartość obliczeniowa oddziaływania siły skupionej
- F_{cr} – obciążenie krytyczne pod obciążeniem skupionym

F_y	– obciążenie plastyczne od siły skupionej
G	– moduł sprężystości przy ścinaniu
G_k	– nominalna wartość efektu oddziaływań stałych
H_{Ed}	– obliczeniowe obciążenie poziome
I	– moment bezwładności przekroju poprzecznego
I_T	– moment bezwładności przy skręcaniu
I_ω	– wycinkowy moment bezwładności (przy skręcaniu skrępowanym)
I_{st}	– moment bezwładności żebra poprzecznego
I_{sl}	– moment bezwładności żebra podłużnego
$I_{eff,f}$	– moment bezwładności przekroju zastępczego pasa ściskanego względem osi mniejszej bezwładności przekroju
K_v	– współczynnik uwzględniający rozkład momentów i warunki zamocowania
L	– długość pręta
L_{eff}	– długość efektywna oddziaływania obciążenia skupionego
L_c	– rozstaw stężeń bocznych słupa lub belki
L_{ch}	– długość wyboczeniowa gałęzi słupa złożonego
L_{cr}	– długość wyboczeniowa krytyczna
$M_{c,Rd}$	– obliczeniowa nośność przekroju przy zginaniu względem głównej osi bezwładności
M_{cr}	– moment krytyczny przy zwichrzeniu sprężystym
$M_{b,Rd}$	– obliczeniowa nośność elementu na zwichrzenie
M_{Ed}^I	– moment zginający I rzędu
M_{Ed}^{II}	– moment zginający II rzędu
M_{Ed}	– obliczeniowy moment zginający
$M_{pl,Rd}$	– obliczeniowa nośność plastyczna przekroju przy zginaniu
$M_{y,Rd}$	– obliczeniowa nośność przekroju przy zginaniu względem osi y
$M_{z,Rd}$	– obliczeniowa nośność przekroju przy zginaniu względem osi z
$M_{y,Rk}$	– charakterystyczna nośność przy zginaniu względem osi y
M_T	– moment skręcający
N_{Ed}	– obliczeniowa siła podłużna
N_{Rd}	– obliczeniowa nośność przekroju przy obciążeniu siłą podłużną
$N_{c,Rd}$	– obliczeniowa nośność przekroju przy ściskaniu
$N_{t,Rd}$	– obliczeniowa nośność przekroju przy rozciąganiu
N_{cr}	– siła krytyczna przy wyboczeniu giętym
$N_{cr,TF}$	– siła krytyczna przy wyboczeniu gięto-skrętnym
N_{Rk}	– charakterystyczna nośność przekroju przy ściskaniu
$N_{ch,Ed}$	– obliczeniowa siła w pasie słupa złożonego
$N_{pl,Rd}$	– obliczeniowa nośność plastyczna przekroju brutto przy obciążeniu siłą podłużną

$N_{u,Rd}$	– obliczeniowa nośność graniczna przekroju netto z otworami na łączniki przy obciążeniu siłą podłużną
$N_{b,Rd}$	– obliczeniowa nośność elementu na wyboczenie
P	– siła skupiona obciążenia zewnętrznego
R_d	– wartość obliczeniowa nośności
R_k	– wartość charakterystyczna nośności
R_m	– wytrzymałość na rozciąganie według normy wyrobu
S_v	– sztywność postaciowa elementu złożonego
S	– moment statyczny przekroju
S	– sztywność postaciowa pokrycia (blachy)
T_{Ed}	– obliczeniowy moment skręcający
T_{Rd}	– obliczeniowa nośność przekroju przy skręcaniu
$T_{t,Rd}$	– obliczeniowy moment skręcania swobodnego
$T_{w,Rd}$	– obliczeniowy moment giętno-skrętny
Q_r	– obciążenie od siły skupionej
Q_k	– wartość charakterystyczna obciążeń zmiennych
V_{Ed}	– obliczeniowa siła poprzeczna
V_{Ed}	– reakcja pionowa belki
$V_{c,Rd}$	– obliczeniowa nośność środka przy ścinaniu
$V_{pl,Rd}$	– obliczeniowa nośność plastyczna przy ścinaniu
W	– wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego
W_{eff}	– wskaźnik wytrzymałości przekroju współpracującego
W_{pl}	– wskaźnik oporu plastycznego

Małe litery łacińskie

a	– odległość między żebrami poprzecznymi środka
a_w	– grubość spoin
b	– szerokość przekroju
b_{eff}	– szerokość efektywna przekroju współpracującego
b_f	– szerokość pasa belki
d	– średnica śruby
d	– średnica zewnętrzna pręta rurowego okrągłego
d	– średnica krzyżulca w słupie złożonym
d_o	– średnica otworu
e	– mimośród oddziaływań
e_0	– strzałka imperfekcji elementu
e_N	– przesunięcie środka przekroju współpracującego względem środka ciężkości
h	– wysokość przekroju poprzecznego

h_i	– wysokość i -tej kondygnacji
h_w	– wysokość środka przekroju
h_d	– odległość między środkami ciężkości pasów
f	– współczynnik modyfikacji do wyznaczania $\chi_{LT,mod}$
f_y	– granica plastyczności stali
f_{yf}	– granica plastyczności stali pasa przekroju
f_{yw}	– granica plastyczności stali środka przekroju
f_u	– wytrzymałość stali na rozciąganie
i	– promień bezwładności względem odpowiedniej osi
i_s	– promień bezwładności względem środka ścinania
k_c	– współczynnik uwzględniający rozkład momentów między tężnikami
k_F	– współczynnik niestateczności
k_{ij}	– współczynnik interakcji
k_σ	– parametr niestateczności przy zginaniu
k_τ	– parametr niestateczności przy ścinaniu
$k_{l,l}$	– współczynnik modyfikacji współczynnika zwichrzenia
l	– rozpiętość, długość
l_y	– efektywna długość
l_{eff}	– długość strefy oddziaływania obciążenia skupionego
r	– promień zaokrąglenia
s_s	– długość strefy docisku
t	– grubość elementu
t_f	– grubość pasa przekroju
t_w	– grubość środka przekroju

Greckie litery

α	– współczynnik rozszerzalności cieplnej liniowej
α	– kąt między osiami pasa i krzyżulca
α_{LT}	– parametr imperfekcji (przy zwichrzeniu i wyboczeniu)
α_{ult}	– mnożnik naprężeń zredukowanych
α_{cr}	– minimalny mnożnik obciążeń obliczeniowych
α_h	– współczynnik redukcji wysokości słupów
β	– współczynnik stosunków szerokości efektywnych
χ	– współczynnik wyboczenia giętnego
χ_F	– współczynnik redukcji obciążeń skupionych
χ_w	– współczynnik redukcji wyboczenia przy ścinaniu
χ_{LT}	– współczynnik zwichrzenia
δ	– ugięcie belki
$\delta_{H,Ed}$	– przemieszczenie poziome słupa (ramy)

ΔH	– przyrost siły poziomej słupa (ramy) spowodowany imperfekcją globalną
ε	– odkształcenie względne
ε_y	– odkształcenia odpowiadające granicy plastyczności
$\gamma_{i,j}$	– współczynnik obciążenia
γ_{M0}	– częściowy współczynnik bezpieczeństwa stosowany przy sprawdzaniu nośności przekroju
γ_{Mi}	– częściowy współczynnik bezpieczeństwa
η_l	– stopień nośności przekroju poprzecznego
λ_F	– parametr smukłości ze względu na niestateczność pod siłą skupioną
λ_1	– smukłość porównawcza
λ	– smukłość względna
λ_p	– smukłość płytowa
$\lambda_{f,z}$	– smukłość pasa ściskanego zastępczego względem osi z
λ_w	– smukłość środka przy ścinaniu
ν	– współczynnik Poissona
ρ	– współczynnik redukcyjny stateczności miejscowej subpanelu i panelu środka przy ściskaniu i zginaniu
$\rho_{loc,i}$	– współczynnik redukcyjny subpanelu środka
σ_{Ed}	– obliczeniowe naprężenie normalne
σ_{eq}	– równoważne naprężenie według hipotez Hubera i Misesa–Hencky’ego
τ_{Ed}	– obliczeniowe naprężenie ścinające
$\sigma_{cr,c}$	– naprężenie krytyczne przy niestateczności typu prętowego
$\sigma_{cr,p}$	– naprężenie krytyczne przy niestateczności typu płytowego
$\sigma_{cr,sl}$	– naprężenie krytyczne przy niestateczności typu prętowego wyizolowanego subpanelu z zębem podłużnym
$\sigma_{com,Ed}$	– maksymalne obliczeniowe naprężenie ściskające
$\sigma_{cr,x}, \sigma_{cr,z}, \tau_{cr}$	– sprężyste krytyczne naprężenie wyboczeniowe
τ_{cr}	– sprężyste naprężenie krytyczne przy ścinaniu
ψ	– stosunek naprężeń brzegowych przekroju poprzecznego
ψ	– stosunek momentów zginających na początku i końcu przęsła belki, słupa

1.1. Zarys produkcji stali

1.1.1. Stal a żelazo

Stal jest stopem żelaza i węgla o zawartości węgla do 2,5%. W stali mogą być inne pierwiastki o łącznej zawartości do 5% (krzem Si, miedź Cu, aluminium Al, chrom Cr, mangan Mn) polepszające właściwości mechaniczne.

Stal konstrukcyjna budowlana zawiera znacznie mniej węgla, do 0,25%, a ponadto niepożądane pierwiastki: potas P, siarkę S o zawartości do 0,07% i azot N.

Żelazo w stanie naturalnym zawarte jest w rudach żelaza – magnetycie, hematycie, limonicie; wytopione czyste żelazo jest kowalne i plastycznie obrabialne.

1.1.2. Produkcja stali i żeliwa

Produkcja stali jest dwuetapowa. Najpierw w wielkich piecach, z rud żelaza wymieszanych z koksem i topnikami oraz dużą ilością nagrzanego powietrza, wytapia się surówkę zawierającą do 6% węgla. Z powodu kruchości zakrzepłej surówki nie można jej obrabiać mechanicznie, czyli kuć, walcować lub zginać.

W drugim etapie produkcji stal wytwarza się w konwertorach Bessemera, Thomasa lub piecach elektrycznych, np. Siemens–Martina. Ten etap produkcji, polegający na utlenianiu surówki stalowniczej, nazywa się także świeżeniem. Dostarczając do ciekłej surówki powietrze lub czysty tlen, uzyskuje się redukcję zawartości węgla, gdyż tlen O_2 reaguje z węglem C, a w wyniku tej redukcji wydzielają się, w postaci gazów, tlenki węgla CO i płynna stal. W podobny sposób redukuje się nadmierne zawartości niepożądanych pierwiastków, czyli potasu, siarki, azotu.

Żeliwo uzyskuje się z przetopienia surówki ze złomem stalowniczym.

1.1.3. Stal – produkt finalny

Płynna stal otrzymana w konwertorze lub piecach zawiera pozostałości tlenków w postaci pęcherzyków gazowych. Przelana do kadzi płynna stal jest odtleniana pierwiastkami: manganem, krzemem, aluminium, aby zakrzepły wlewki nie zawierał tych wad. W zależności od stopnia odtleniania otrzymuje się stale: nieuspokojone, półuspokojone i uspokojone. Od około 2005 roku nie produkuje się stali nieuspokojonych z powodu zmian norm hutniczych. Współcześnie, dalsza produkcja stali polega na stosowaniu takich zabiegów technologicznych, jak pozapiecowa obróbka wytopu, odlewanie ciągle i walcowanie regulowane [31], a także stosowanie obróbek cieplnych. W końcowym etapie procesu produkcji stali kształtują się struktury wewnętrzne (układy żelazo-węgiel), a także właściwości fizyczne i technologiczne.

1.2. Właściwości stali konstrukcyjnych

Wyprodukowane stale na potrzeby budownictwa nazywa się stalami konstrukcyjnymi niestopowymi. Stale te są dostarczane najczęściej w gatunkach S235, S275, S355 oraz S450.

1.2.1. Wartości obliczeniowe stałych materiałowych

Wartości stałych materiałowych stali konstrukcyjnych są następujące:

- moduł sprężystości podłużnej (Younga)

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2 = 210 \text{ GPa},$$

- moduł sprężystości poprzecznej (Kirchoffa)

$$G = 81000 \text{ N/mm}^2 = 8,1 \cdot 10^3 \text{ kN/cm}^2 = 81,0 \text{ GPa},$$

- sprężysty współczynnik Poissona $\nu = 0,3$,

- współczynnik rozszerzalności liniowej cieplnej $\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\text{K}}$,

- gęstość objętościowa (masa właściwa) $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.

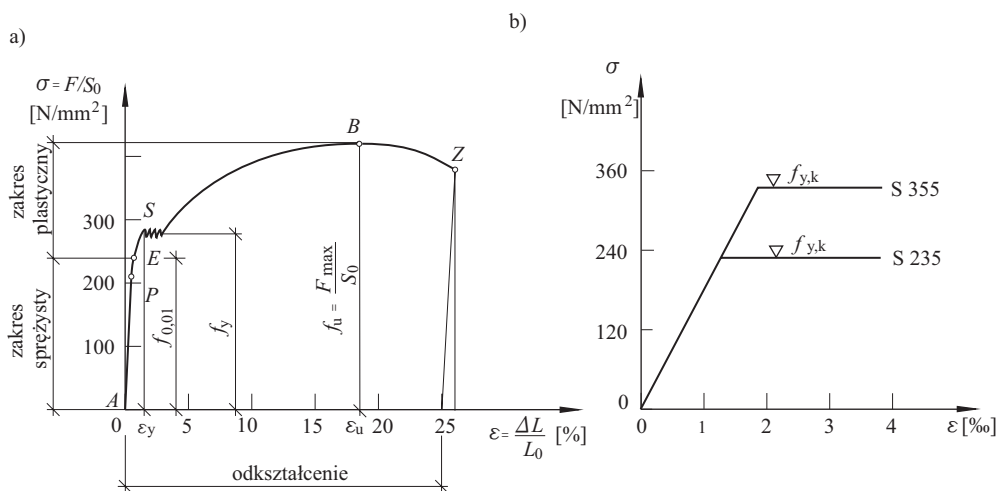
1.2.2. Właściwości mechaniczne

Właściwości mechaniczne stali określają ich odporność na działania różnych obciążeń. Do charakterystycznych właściwości mechanicznych należy zaliczyć: wytrzymałość, udurowienie, twardość, kujność, spawalność, a ponadto ciągliwość, odporność na kruche pękanie, odporność na pękanie lamelarne (rozwarstwiające).

1.2.2.1. Wytrzymałość stali

Właściwości mechaniczne poszczególnych gatunków stali mogą być zróżnicowane. Informacje o właściwościach wytrzymałościowych i plastycznych określa się w statycznej próbie rozciągania próbek stalowych. Na rysunku 1.1a przedstawiono charakterystykę statycznej próby rozciągania stali S235 z wyraźnym płynięciem plastycznym, czyli z doraźną granicą plastyczności f_y , a na rysunku 1.1b wyidealizowany wykres liniowy sprężysto-plastyczny stali S235 i stali S355.

W zakresie od punktu A do P wydłużenie jest wprost proporcjonalne do obciążenia, czyli podlega prawu Hooke'a. Ponieważ punkt P określający granicę proporcjonalności znajduje się na początku krzywej, więc dość trudno jest ustalić jego dokładne położenia. W praktyce inżynierskiej granice sprężystości może określać punkt E opisujący naprężenie $f_{0,01}$ odpowiadające odkształceniu $\varepsilon = 0,01\%$. Punkt B na krzywej rozciągania określa granicę wytrzymałości badanej próbki stali.



Rys. 1.1. Wykres rozciągania naprężenie-odkształcenie: a) rzeczywisty stali S235, b) zlinearyzowany sprężysto-plastyczny

W praktycznym projektowaniu elementów stalowych istotne znaczenie mają:

- granica plastyczności f_y ,
- granica wytrzymałości f_u .

Na rysunku 1.1a jako granicę plastyczności f_y oznaczono górną granicę ścieżki płynięcia plastycznego (punkt S), czyli początek trwałego odkształcenia plastycznego ε_y próbki. Dla stali bez wyraźnej granicy plastyczności wyznacza się jej umowną wartość $f_{y,0.2}$ jako naprężenie osiągnięte przy umownym odkształceniu plastycznym $\varepsilon_y = 0,2\%$. Moduł sprężystości wyznacza się ze stosunku $E = \sigma/\varepsilon = 210000$ N/mm², który dla różnych gatunków stali ma tę samą wartość.

Wydłużenie Δl jest przyrostem długości bazowej l rozciąganej próbki. Granica wytrzymałości f_u jest naprężeniem odpowiadającym największej sile obciążającej próbkę podczas statycznej próby rozciągania.

Na rysunku 1.1b oznaczono charakterystyczną wartość granicy plastyczności $f_{y,k} = f_y / \gamma_M$, gdzie γ_M jest współczynnikiem materiałowym, który według załączników krajowych norm Eurokod przyjmuje wartość $\gamma_M = 1,0$.

1.2.2.2. Ciągliwość stali

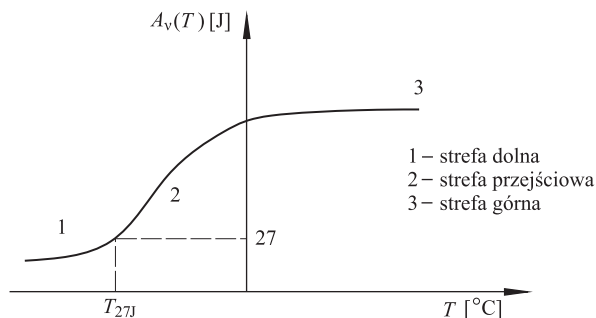
Ciągliwość stali określa jej odkształcalność plastyczną. W statycznej próbie rozciągania (rys. 1.1a) ciągliwość określa procentowe wydłużenie względne, czyli $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%$, przy czym Δl jest to bezwzględne wydłużenie próbki o długości l .

Zgodnie z normą PN-EN 1993-1-1 wymaganą minimalną ciągliwość stali określają warunki:

- wydłużenie $\varepsilon_u = 15\%$ przy zniszczeniu próbki o umownej długości $l = 5,65 \sqrt{A_0}$ (A_0 – przekrój początkowy próbki),
- wydłużenie przy zniszczeniu $\varepsilon_u \geq 15 \varepsilon_y$ (rys. 1.1a), $\varepsilon_y = f_y / E$,
- stosunek granicy wytrzymałości do granicy plastyczności $f_u / f_y \geq 1,1$.

1.2.2.3. Udarowość stali – odporność na kruche pękanie

Miarą udarowości stali jest wartość pracy w J (dżulach) zużytej na złamanie próbki z karbem o przekroju poprzecznym 1 cm^2 . Wartość tej pracy zależy także od temperatury otoczenia próbki. Im temperatura niższa, tym wartość tej pracy jest mniejsza (rys. 1.2). Próby udarowości wykonuje się na młotach Charpy'ego.



Rys. 1.2. Wpływ temperatury T na wartość pracy łamania $A_v(T)$

Zniszczenie kruche elementu stalowego następuje w sposób gwałtowny, bez widocznych odkształceń plastycznych.

Odporność stali na kruche pękanie (zniszczenie) zależy, przede wszystkim, od wartości pracy łamania próbek, czyli od uderności stali.

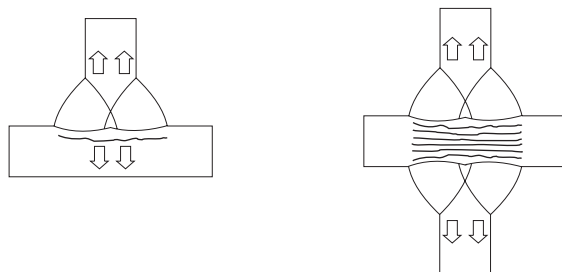
Czynnikami wpływającymi na skłonność stali do kruchego pękania są ponadto:

- niska temperatura (poniżej -20°C),
- obciążenie dynamiczne,
- rodzaj struktury ziarnistej stali,
- wieloosiowy stan naprężenia (spiętrzenia naprężeń),
- obecność karbów (nieciągłości przekrojów poprzecznych, wcięcia, rowki poprzeczne, otwory odsadzenia, nieobrobione spoiny, korozja wgłębna).

Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie, zgodnie z normą PN-EN 1993-1-10, dotyczy spawanych elementów obciążonych wielokrotnie znacznymi naprężeniami rozciągającymi, a więc elementów konstrukcyjnych narażonych na zmęczenie.

1.2.2.4. Odporność na pękanie rozwarstwiające

Środkniki kształtowników stalowych, a zwłaszcza blachy o grubościach powyżej 15 mm, pod wpływem obciążeń prostopadłych do ich powierzchni mogą ulegać pęknięciom rozwarstwiającym (rys. 1.3). W szczególności dotyczy to elementów spawanych.



Rys. 1.3. Pęknięcia lamelarne (rozwarstwiające)

Odporność na pękanie rozwarstwiające (lamelarne) zależy od stopnia uspokojenia ciekłej stali. Zasady doboru stali ze względu na ciągłości między warstwowe dotyczą przede wszystkim połączeń spawanych. Zasady określania ryzyka pęknięć lamelarnych określa norma PN-EN 1993-1-10.

1.2.3. Spawalność stali

Spawalność elementu konstrukcyjnego zależy od spawalności stali, z której jest wytworzony, oraz od możliwości wykonawczych i technologicznych. Spawalność stali w podstawowym stopniu zależy od jej składu chemicznego (zawartość

węgla do 0,25%). Na właściwości połączenia spawanego wpływają także inne czynniki:

- cieplny cykl spawania,
- rodzaj elektrody – drutu dodawanego podczas spawania,
- technologii układania spoin,
- parametrów spawania (natężenie prądu, temperatura płomienia, wilgotność atmosferyczna).

Stale konstrukcyjne stosowane w budownictwie mają taki skład chemiczny, jaki jest wymagany dla stali spawalnych. Wytyczne określania spawalności stali ferrytycznych podano w normach: PN-EN 1011-1 i PN-EN 1011-2.

1.3. Symbole i ich układy charakteryzujące gatunki stali oraz ich właściwości mechaniczne, technologiczne i użytkowe

W hutnictwie krajowym i europejskim produkowane są stale używane w budownictwie i przemyśle, które są oznakowane cyframi i liczbami – symbolami opisującymi: gatunek stali, właściwości mechaniczne i technologiczne oraz użytkowe, powiązane ściśle z gotowymi wyrobami dostarczany na rynki handlowe. Cechy stali i ich wyrobów hutniczych opisane są w normach PN-EN 10025-2–PN-EN 10025-6, a warunki dostawy przedstawiono w normie PN-EN-10025-1.

Wyszczególniono w normach symbolami

- gatunki stali:
 - S – stal konstrukcyjno-budowlana,
 - B – stal zbrojeniowa betonów,
 - Y – stal do cięgien napinających,
 - P – stal na zbiorniki ciśnieniowe,
 - E – stal w budowie maszyn itd.;
- wartość pracy łamania próbki w próbie udarności Charpy’ego $A_v(T)$ oznaczono literami:
 - J = 27 dżuli,
 - K = 40 dżuli,
 - L = 60 dżuli;
- temperaturę łamania próbki T oznaczoną literą R i cyframi 0–6:
 - R = 20°C,
 - 0 = 0°C,
 - 2 = –20°C,
 - 3 = –30°C,
 - 4 = –40°C,

5 = -50°C ,

6 = -60°C ;

- właściwości lub przeznaczenie szczególniejsze stali:

C – do formowania na zimno,

H – na kształtowniki zamknięte,

L – do stosowania w niskich temperaturach,

M – walcowana termomechanicznie,

N – normalizowana,

T – do produkcji rur,

Q – do ulepszania cieplnego,

W – odporna na korozję atmosferyczną;

- zwiększoną odporność na pękania rozwarstwiające (lamalarne): + Z15 – minimalne przewężenie 15%, +Z25 – minimalne przewężenie 25%, +Z35 – minimalne przewężenie 35%;

- granicę plastyczności – wartości minimalnych granic plastyczności wyrobów gotowych zależą od ich właściwości mechanicznych (głównie składu chemicznego stali) i grubości; w budownictwie stosuje się stale o granicy plastyczności f_y od 185 N/mm² do 960 N/mm².

Zamawiający dany wyrób stalowy tworzy z tych oddzielnych symboli ich uporządkowany układ, charakteryzujący właściwości stali. Dla wyrobów stalowych przeważnie stosowanych w budownictwie (kształtowniki, blachy) utworzono układy tych symboli opisujące ich właściwości mechaniczne, technologiczne, użytkowe. W tablicy 1.1 zestawiono objaśnienie znaczeń układów symboli na przykładzie stali konstrukcyjnych: S235JRW i S355K2L + Z15.

Tablica 1.1. Objasnienia znaczeń układów symboli stali budowlanych

Układ symboli	Gatunek stali	Minimalna granica plastyczności f_y , N/mm ²	Praca łamania próbki $A_v(T)$ J	Temperatura łamania $T^{\circ}\text{C}$	Właściwości lub przeznaczenie szczególniejsze	Zwiększona odporność na pękania rozwarstwiające
S235JRW	S – stal konstrukcyjna	235	$A_v = J = 27$ [J]	$T = R = +20^{\circ}\text{C}$	W – stal odporna na korozję atmosferyczną	–
S355K2L + Z15	S – stal konstrukcyjna	355	$A_v = K = 40$ [J]	$T = 2 = -20^{\circ}\text{C}$	L – stal do stosowania w niskich temperaturach	+ Z15 – podwyższona odporność na pękanie rozwarstwiające

1.4. Cechy mechaniczne, skład chemiczny stali

Cechy mechaniczne stali są powiązane z gotowymi wyrobami hutniczymi. W stalowych szkieletach nośnych mogą być stosowane kształtowniki, pręty i wyroby płaskie walcowane na gorąco. Wartości liczbowe podstawowych cech mechanicznych, skład chemiczny stali konstrukcyjnych najczęściej stosowanych w budownictwie opisanych w normach PN-EN 10025 zestawiono w tablicy 1.2.

Wartości granicy plastyczności f_y i granicy wytrzymałości f_u innych rodzajów stali konstrukcyjnych podano w normie PN-EN 1993-1-1, a właściwości technologiczne i użytkowe omówiono w rozdziale 3 pracy [7].

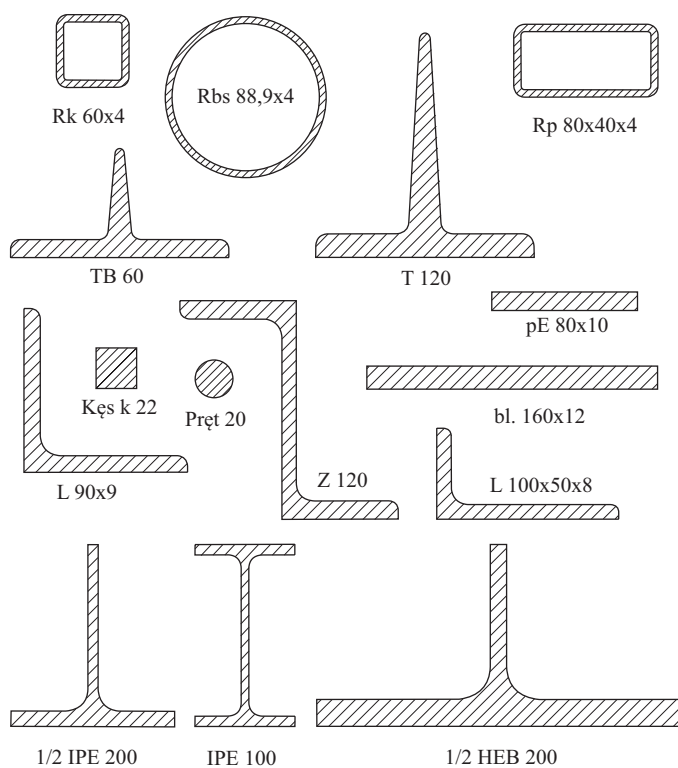
Tablica 1.2. Nominalne wartości granicy plastyczności f_y , granicy wytrzymałości f_u , wydłużenia procentowego i składu chemicznego stali konstrukcyjnych walcowanych na gorąco o grubości do 40 mm

Gatunek stali	Udział procentowy w stali				Granica plastyczności f_y , N/mm ²	Granica wytrzymałości f_u , N/mm ²	Minimalne wydłużenie %	Sposób odtlenienia
	węgiel C	potas P	siarka S	azot N				
S235JR	od 0,17 do 0,20	0,045	0,045	0,007	235	360	26	półspokojona
S235J2	0,17	0,035	0,035	0,09	235	360	26	uspokojona
S355J2	0,20	0,035	0,035	–	355	510	22	uspokojona
S275	–	–	–	–	275	430	22	–
S450	–	–	–	–	440	550	17	–

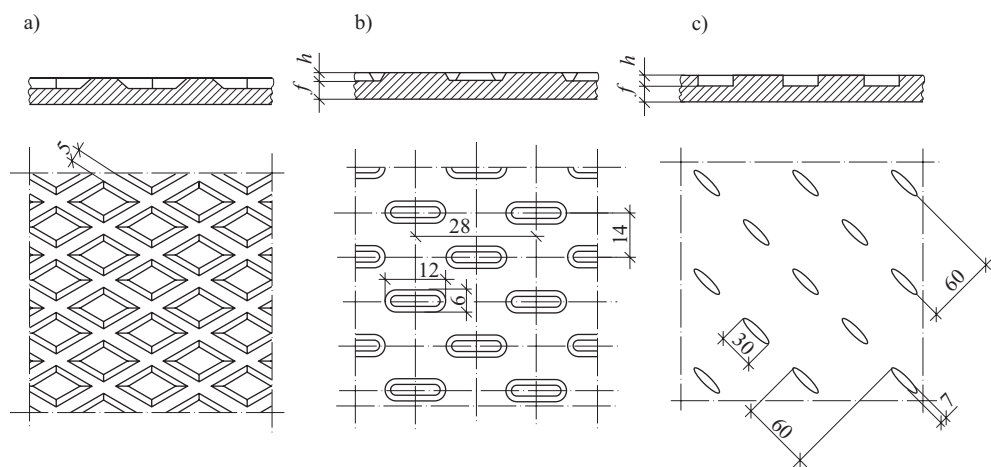
1.5. Stalowe wyroby hutnicze

W wyniku walcowania na gorąco, a także innych procesów technologicznych otrzymuje się asortyment wyrobów:

- kształtowniki: I (INP), IPE, HEA, HEB, HEM, HEAA, [, L, T;
- pręty okrągłe o średnicy $d \geq 5$ mm (rys. 1.4), pręty sześćio- i ośmiokątne o wymiarze $d \geq 10$ mm, półokrągłe, kwadratowe o wysokości $h \geq 8$ mm, prostokątne;
- płaskowniki o szerokości b od 10 do 150 mm i grubości t od 5 do 60 mm, o długościach od 6 do 12 m;
- blachy o szerokościach b od 150 do 3000 mm, $t \geq 3$ mm;
- blachy podłogowe i schodowe o grubościach $t \geq 3$ mm (rys. 1.5);

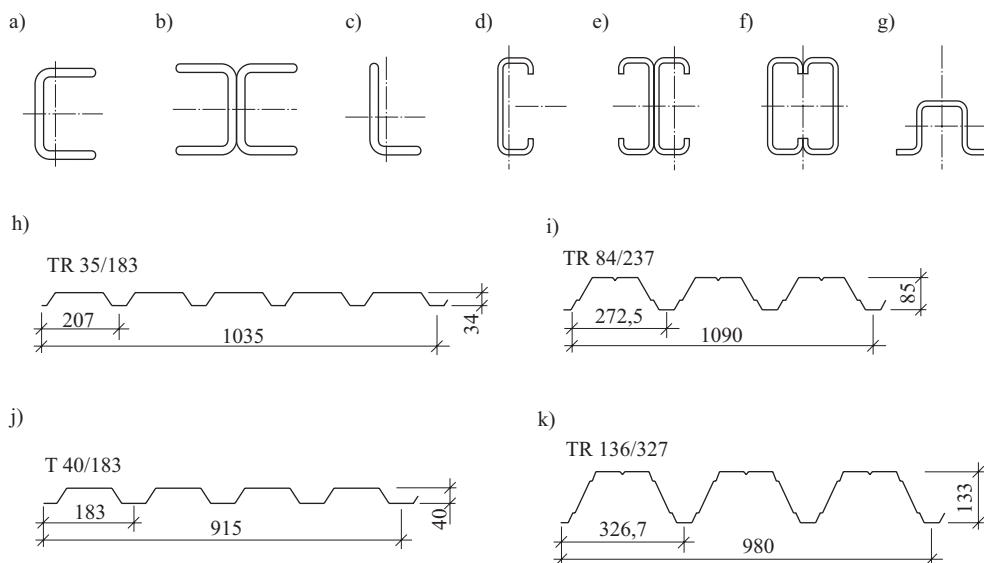


Rys. 1.4. Przykłady kształtowników walcowanych



Rys. 1.5. Blachy podłogowe, chodnikowe i schodowe: a) żeberkowa, b) brodawkowa, c) owalno-żeberkowa

- rury: kwadratowe, prostokątne, okrągłe o grubościach ścianek $t \geq 2$ mm;
- profile zimnogięte o grubościach $t \geq 0,5$ mm (rys. 1.6);
- blachy zimnogięte (rys. 1.6);
- kształtowniki spawane wytwarzane na liniach technologicznych (IKS, HKS, IPBS, IKSH).



Rys. 1.6. Przykładowe przekroje poprzeczne profili zimnogiętych i blach fałdowych

Wymiary przekrojów poprzecznych, pola przekrojów, momenty bezwładności i inne cechy geometryczne są zestawione w tablicach [1, 8].

1.6. Właściwości mechaniczne stali w różnych temperaturach

1.6.1. Temperatury klimatyczne

Na nośność i niezawodność konstrukcji metalowych eksploatowanych w kraju mogą mieć wpływ temperatury:

- klimatyczne,
- pożarowe,
- technologiczne.

Gdy projektuje się konstrukcję, przyjmuje się temperaturę odniesienia $+10^{\circ}\text{C}$, która jest umowną temperaturą scalania konstrukcji. W przypadku projektowania elementów metalowych konstrukcji wpływ temperatur klimatycznych niższych i wyższych od umownej temperatury scalania $+10^{\circ}\text{C}$ jest różny. Zarówno temperatury -30°C , jak i wyższe niż $+30^{\circ}\text{C}$ mogą generować w konstrukcji dodatkowe naprężenia spowodowane brakiem swobody odkształcania długich elementów konstrukcyjnych. Temperatury klimatyczne, zwłaszcza niższe, mogą wpłynąć na zmianę (pogorszenie się) właściwości fizycznych metalu konstrukcji.

Wpływ temperatur klimatycznych jest zróżnicowany w odniesieniu do budowli parterowych i wielokondygnacyjnych. Dla obiektów parterowych w obliczeniach można pominąć wpływ temperatur pochodzenia klimatycznego, projektując dylatacje termiczne w kierunku podłużnym obiektu. Zgodnie z normą PN-90/B-03200 zaleca się następujące warunki dla obiektów parterowych:

- długość obiektu lub jego części oddylatowanej nie powinna przekroczyć
 - w budynkach zamkniętych (halach) – 150 m,
 - w obiektach otwartych (estakadach) – 120 m;
- odległość między najdalszymi podporami poziomymi (stężającymi ramami portalowymi lub pionowymi stężeniami międzysłupowymi) przekazującymi obciążenia na fundament w kierunku podłużnym hali nie powinna przekraczać 60 m.

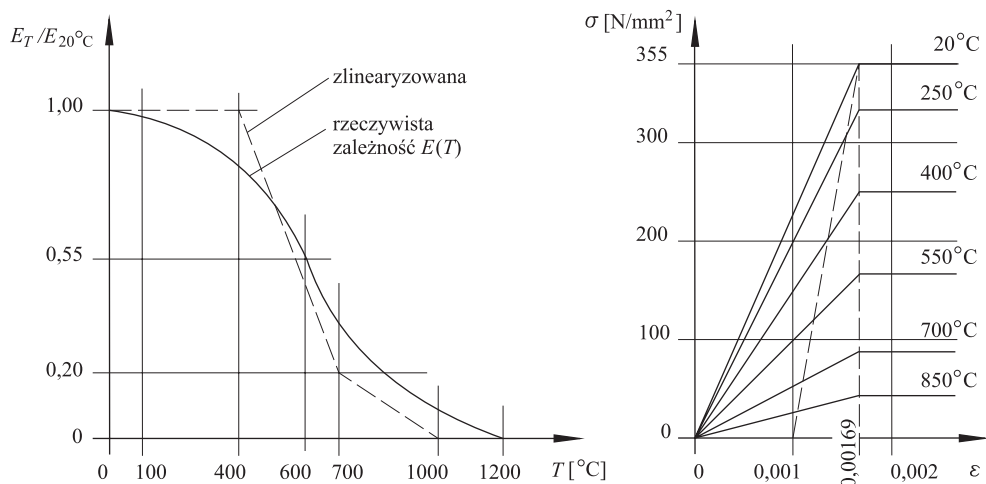
Wskutek działania temperatur klimatycznych słupy zewnętrzne mogą ulegać przeciążeniu latem, a słupy wewnętrzne – w zimie. Naprężenia wywołane działaniem temperatur klimatycznych w stanie sprężystym konstrukcji sięgają do 15% nośności obliczeniowej lub więcej, gdy uwzględnia się wpływ wyboczenia.

Temperatury klimatyczne mają duży wpływ na właściwości sprężysto-plastyczne niektórych gatunków stali. Na rysunku 1.2 pokazano krzywą obrazującą zmianę energii absorbowanej w próbie udarności Charpy'ego dla stali konstrukcyjnych niskostopowych w różnych temperaturach. Niskie temperatury klimatyczne do -60°C zmniejszają odporność stali na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową.

1.6.2. Temperatury pożarowe

W wyższych temperaturach (powyżej 200°C) maleją zarówno wytrzymałość stali, jak i moduły sprężystości podłużnej i poprzecznej. W temperaturze około 500°C wytrzymałość i moduł Younga E zmniejszają się do około 2/3 wartości określonych w temperaturze 20°C .

Na rysunku 1.7 przedstawiono zmiany wartości modułu E i wytrzymałości przy wzrastających temperaturach.



Rys. 1.7. Wpływ wzrostu temperatury na wartości modułu E i wytrzymałości stali konstrukcyjnej S235

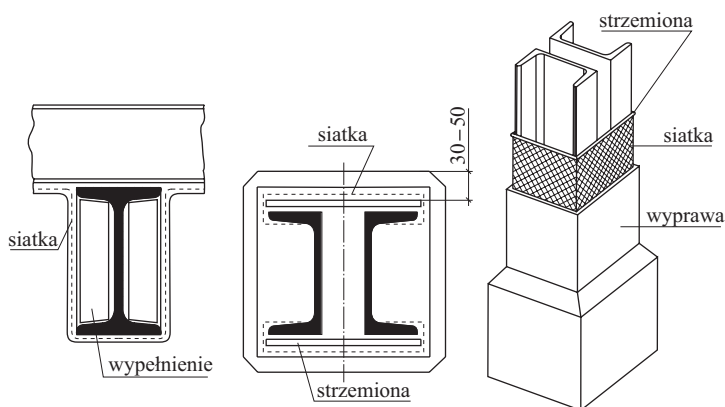
1.6.3. Zabezpieczenia zwiększające odporność ogniową elementów stalowych

Uwzględniając zagrożenie pożarem, inżynier, w zależności od ważności obiektu, powinien projektować ochronę elementów stalowych, zwiększając ich odporność ogniową. Zabezpieczenia można podzielić na zasadnicze grupy:

- ogólne rozwiązania koncepcyjne konstrukcji uwzględniające aspekty pożarowe (dostęp ognia do konstrukcji, drogi i wyjścia ewakuacyjne, awaryjne itp.);
- zabezpieczenia i środki, za pomocą których można lokalizować lub zlikwidować stany pożarowe (przeciwpożarowe zbiorniki wodne, sieci wodociągowe wewnętrzne lub zewnętrzne, otwory dymowe);
- ochrony integralnie związane z konstrukcją: okładziny, otuliny, wypełnianie przekrojów zamkniętych płynami lub betonem, powłoki malarskie.

Podstawowym sposobem zabezpieczenia elementów konstrukcji metalowych przed pożarem jest stosowanie okładzin izolujących powierzchnie metalowe od źródeł podwyższonych temperatur. Przykłady wykonania izolacji przeciwogniowych przedstawiono na rysunku 1.8. Do typowych materiałów ochronnych stali należą: okładziny betonowe z płyt, tynku gipsowo-betonowego na siatkach, okładziny z płyt ceramicznych, tworzyw sztucznych, wełny bazaltowej na spoiwie cementowym, warstw z włókna szklanego itp.

Izolację przeciwogniową elementów konstrukcyjnych narażonych na pożary należy projektować według norm PN-EN 1991-1-2 i PN-EN 1993-1-2 oraz przepisów krajowych.



Rys. 1.8. Okładziny elementów stalowych

Zagadnienia odporności ogniowej i zasady obliczania nośności konstrukcji w warunkach pożaru omówiono w rozdziale 10 pracy [7].

1.7. Korozja stali

1.7.1. Rodzaje korozji

Korozja polega na utlenianiu się warstw powierzchni stalowej, przy czym warstwa tlenku żelaza nie stanowi zabezpieczenia. Następuje więc korozja wglębna aż do likwidacji materiału.

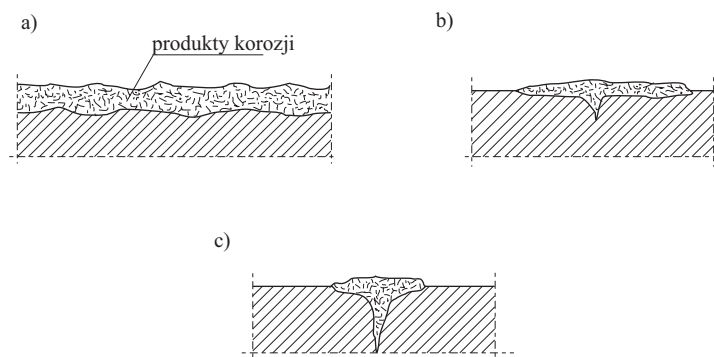
Proces korozyjny i jego szybkość w warunkach atmosferycznych zależy od następujących czynników:

- warunków eksploatacyjnych,
- stopnia zanieczyszczenia atmosfery,
- czasu oddziaływania zanieczyszczonej atmosfery na metal,
- temperatury powietrza,
- stanu powierzchni konstrukcji,
- składu chemicznego stali (zawartość węgla, pierwiastków stopowych),
- wilgotności powietrza,
- wielkości naprężeń od obciążeń mechanicznych.

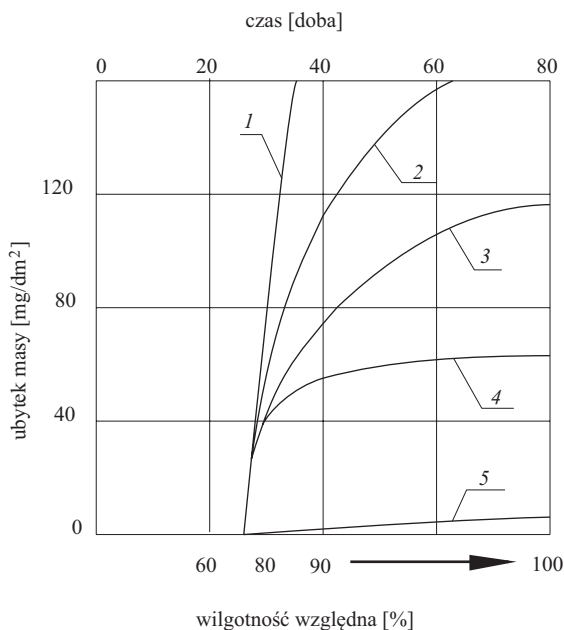
W stali może występować korozja elektrochemiczna. Powstaje, gdy w elektrolicie znajdują się dwa różne metale. Wtedy rozpuszczeniu, czyli korozji, ulega metal anody. Funkcję elektrolitu może spełniać woda wykondensowana z atmosfery, wilgoć, cząstki kurzu z zaabsorbowaną wilgocią itp.

Ze względu na wynik oddziaływania rozróżnia się następujące rodzaje korozji:

- korozję równomierną, zachodzącą na całej powierzchni elementów metalowych (rys. 1.9a);
- korozję wżerową, która powstaje tylko w pewnych miejscach powierzchni, wskutek czego tworzą się w tych miejscach zagłębienia zwane wżerami (rys. 1.9b, c); wżery są często wskrośne;



Rys. 1.9. Korozja: a) powierzchniowa równomierna, b) perforacje, c) wżery



Rys. 1.10. Wpływ wilgotności i zanieczyszczeń powietrza na korozję stali: 1 – cząstki sadzy + 0,01% SO_2 , 2 – cząstki siarczanu amonu bez SO_2 , 3 – wyłącznie 0,01% SO_2 , 4 – cząsteczki siarczanu amonu z SO_2 , 5 – czyste powietrze

- korozję międzykrystaliczną, zachodzącą na granicach ziarn bez naruszenia ich wnętrza; tego rodzaju korozja rozprzestrzenia się w głąb metalu po granicach ziarn, co powoduje naruszenie spójności metalu;
- korozję naprężeniową, powstającą wskutek istnienia w metalu naprężeń własnych generowanych odkształceniami mechanicznymi (np. uderzeniami młotką);
- korozję kontaktową, która powstaje na styku z innymi metalami, np. stopem miedzi.

O szybkości korozji w powietrzu decydują trzy czynniki: wilgotność względna, zanieczyszczenia i dobowe wahania temperatury. Szczególnie szkodliwe są zanieczyszczenia, a wśród nich tlenek siarki oraz różne chlorki i siarczany (rys. 1.10).

1.7.2. Ochrona przed korozją

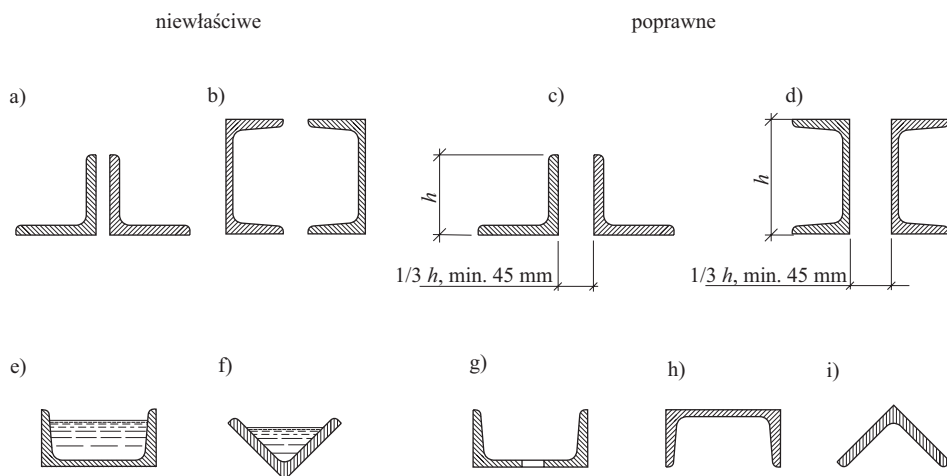
Najwłaściwszymi sposobami walki z korozją są:

- odpowiedni dobór składu chemicznego materiału konstrukcyjnego,
- racjonalne projektowanie,
- prawidłowe stosowanie powłok ochronnych,
- właściwe wykonawstwo i eksploatacja.

Projektowanie konstrukcji stalowych należy rozpocząć od rozważenia możliwości zastosowania gatunków stali trudno rdzewiejących. W warunkach bardzo silnej agresywności środowiska celowe jest jednak, także dla tych stali, projektowanie powłok antykorozyjnych. Na ogół jednak konieczne jest stosowanie stali mało odpornych na wpływy środowiska, a więc wymagających ochrony. Przy doborze typu konstrukcji oraz przekrojów jej elementów, oprócz kryterium wymiarowania wynikającego z metody stanów granicznych, należy również uwzględniać aspekty ochrony przed korozją.

Elementy konstrukcyjne powinny być zaprojektowane w taki sposób, aby możliwe było ich zabezpieczenie (aby był dostęp) powłokami antykorozyjnymi (rys. 1.11).

Stosowanie większych rozpiętości elementów prowadzi do projektowania przekrojów o większych grubościach ścianek, co ogranicza wpływ ubytków korozyjnych na nośność konstrukcji, np. zwiększenie rozpiętości hali od 6 do 12 m zmniejsza o 27% powierzchnię zewnętrzną elementów stalowych narażonych na korozję. Zmniejsza też wtedy powierzchnię ochronnej powłoki malarskiej. Poszczególne elementy tej samej konstrukcji w różny sposób narażone są na korozyjne oddziaływania otoczenia.



Rys. 1.11. Poprawne i niewłaściwe położenie kształtowników metalowych: a), b) brak dostępu przy malowaniu, c), d) wymagany dostęp $1/3 h$ (nie mniej niż 45 mm), e), f) kształtownik zatrzymuje wodę, g) kształtownik z otworem ściekowym, h) i i) najlepsze położenie

1.7.3. Powłoki antykorozyjne

Powłoki antykorozyjne mogą być: metaliczne, malarskie i elektrochemiczne.

Powłoki metaliczne wykonuje się z cynku i aluminium poprzez natrysk za pomocą pistoletów. Jako samodzielne powłoki ochronne są skuteczne, gdy narażenia korozyjne są nieznaczne oraz w wysokich temperaturach. Stanowią także dobre podkłady pod powłoki malarskie.

Powłoki malarskie są najpowszechniejszym sposobem antykorozyjnej ochrony konstrukcji stalowych. Skuteczność powłoki malarskiej zależy od:

- składu chemicznego zestawu malarskiego,
- liczby naniesionych warstw,
- całkowitej grubości powłoki,
- przygotowania i oczyszczenia powierzchni do malowania.

Współcześnie stosuje się następujące chemoodporne materiały i emalie malarskie na powłoki antykorozyjne: ftalowe, fenolowo-formaldehydowe, epoksydowe, poliestrowe. Powłoki elektrochemiczne mają zastosowanie głównie do zabezpieczania przed korozją stalowych rurociągów w gruntach nawodnionych, stalowych zbiorników na niektóre ciecze oraz innych, zwłaszcza w agresywnych środowiskach.