

Jan Żmuda

PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH

cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

 PWN

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 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
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 użytkowalności	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 (ciągna i liny)	60
3.3.1. Zastosowanie oraz rodzaje cięgien i lin	60
3.3.2. Nośność cięgien i lin	62
3.3.3. Zakotwienie cięgien	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 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
7. Słupy stalowe	201
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
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 rygła 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.

1

Stal, produkcja, właściwości, wyroby

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 uspokocone. 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) $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.

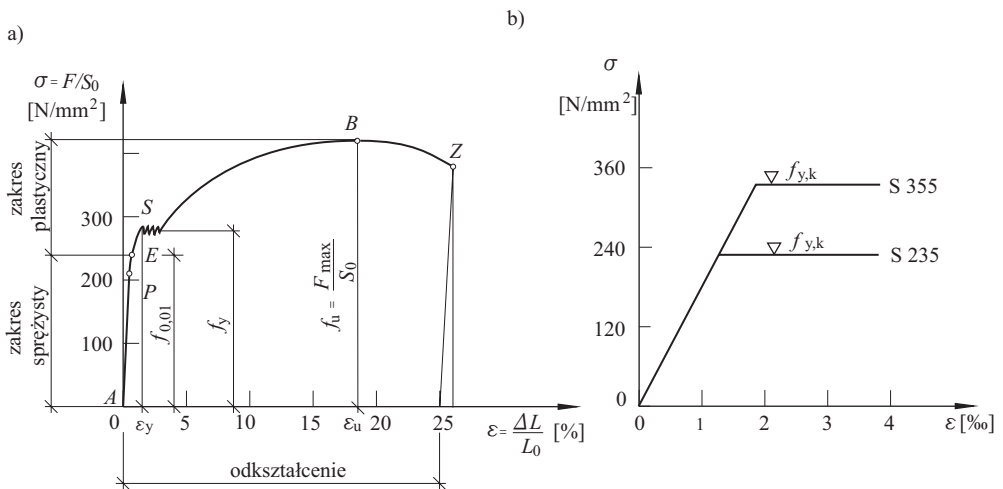
1.2.2. Właściwości mechaniczne

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 położenie. 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 $f_{y,02}$ jako naprężenie osiągnięte przy umownym odkształceniu plastycznym $\varepsilon_y = 0,2\%$. Moduł sprężystości wyznacza się ze stosunku $E = \sigma/\varepsilon = 210000 \text{ N/mm}^2$, 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

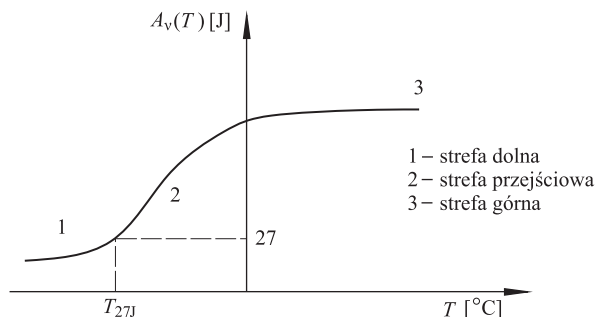
Ciągliwość stali określa jej odkształcalność plastyczną. W statycznej próbie rozciągania (rys. 1.1a) ciągliwość określa procentowe wydłużenie względne, czyli $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%$, przy czym Δl jest to bezwzględne wydłużenie próbki o długości l .

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. Udarność stali – odporność na kruche pękanie

Miarą udarności 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 udarności 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 udarności stali.

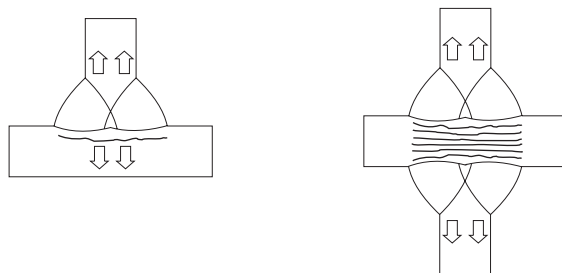
Czynnikami wpływającymi na skłonność stali do kruchego pęknięcia są ponadto:

- 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

Środniki 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 ciągliwość międzywarstwowe 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 dostarczonymi 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 pęknięcia 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/mm^2 do 960 N/mm^2 .

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 tabelicy 1.1 zestawiono objaśnienie znaczeń układów symboli na przykładzie stali konstrukcyjnych: S235JRW i S355K2L + Z15.

Tabela 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 pęknięcia 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 pęknięcia rozwarstwiające