

Rysunek 9.38. Warianty rozwiązań podciągów i rygli ram (opis w tekście)

wą wykonuje się z dwuteowników szerokostopowych lub z dwóch dwuteowników. Zespolone belki drugorzędne projektuje się jako swobodnie podparte (rozwiązanie b)).

W drugim wariancie instalacyjne są prowadzone w dwóch poziomach wzdłuż belek i podciągów (rozwiązanie a) i c)) lub na jednym poziomie (rozwiązanie d)). W rozwiązaniach a) i c) zespolone belki drugorzędne projektuje się jako ciągłe, a w rozwiązaniu d) jako swobodnie podparte. W rozwiązaniach c) i d) rozpiętości podciągów są zwykle większe niż rozpiętości belek.

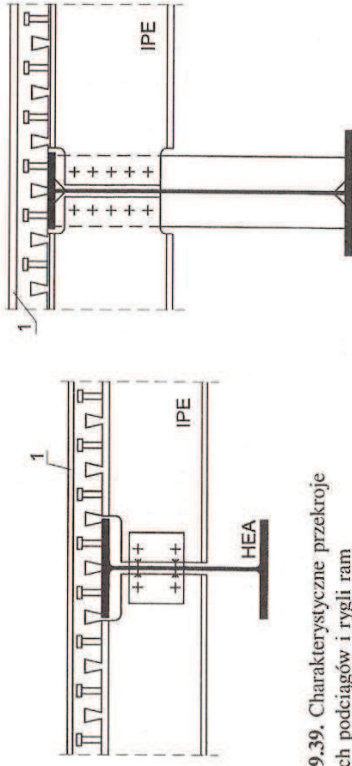
9.6.2. Kształtowanie i obliczanie elementów

Podciągi i rygle stalowe kształtuje się i oblicza według PN-EN 1993-1-1, a ich połączenia ze słupami – według PN-EN 1993-1-8.

Podciągi i rygle zespolone projektuje się z dwuteowników walcowanych lub spawanych, zależnie od rozpiętości i obciążeń (rys. 9.39).

Najczęściej są stosowane dwuteowniki równoległoscienne IPE i szerokostopowe HEA. Dwuteowniki szerokostopowe wprowadza się w celu zmniejszenia wysokości przekroju elementu i łatwiejszego rozmieszczenia łączników do zespolenia z betonem. Każde zmniejszenie wysokości konstrukcyjnej powoduje zwiększenie zużycia stali, lecz jednocześnie wpływa na zmniejszenie kubatury budynku i powierzchni ścian zewnętrznych. Czynniki te należy uwzględnić przy wyborze danego rozwiązania.

Błachownice spawane są stosowane przy dużych rozpiętościach i obciążeniach, gdy nośność i sztywność dostępnych kształtowników walcowanych są niewystarczające. Projektuje się je o przekroju niesymetrycznym (rys. 9.39b).



Rysunek 9.39. Charakterystyczne przekroje zespolonych podciągów i rygli ram

Nośność przekrojów oblicza się według zasad podanych dla belek, a połączenia węzłowe – według rozdziału 8.5. Łączniki ścinane rozmieszcza się przy uwzględnieniu rzeczywistego rozkładu siły rozwarstwiającej.

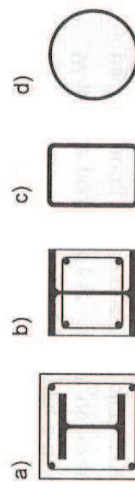
Rozwiązania konstrukcyjne i zasady obliczeń elementów zespolonych o konstrukcji ażurowej i kratowej można znaleźć w opracowaniu [5]. Wytyczne do projektowania podciągów o konstrukcji ażurowej podano w pracy [6], a belek i podciągów kratowych w opracowaniu [7].

9.7. Słupy

9.7.1. Ogólne zasady projektowania

Słupy zespolone projektuje się w postaci obetonowanych kształtowników stalowych lub rur wypełnionych betonem. Obetonowanie kształtowników może być całkowite lub częściowe. Przekroje poprzeczne najczęściej stosowanych słupów przedstawiono na rysunku 9.40. Przekrój powinien mieć dwie osie symetrii i być stały na całej długości słupa. Szczegółowe warunki, jakim powinny odpowiadać przekroje słupów, podano w PN-EN 1994-1-1/8.7.1, a połączenia podstawy stalowego trzonu z fundamentami – w PN-EN 1993-1-8.

Rysunek 9.40. Przekroje poprzeczne najczęściej stosowanych słupów zespolonych: a) dwuteowy całkowicie obetonowany, b) dwuteowy częściowo obetonowany, c) i d) przekroje rurowo wypełnione betonem



W elementach obetonowanych należy stosować zbrojenie złożone z prętów podłużnych i strzemion zgodnie z wymaganiami zawartymi w PN-EN 1992-1-1

dla słupów żelbetonowych. Grubość otuliny słupa stalowego w elementach całkowicie obetonowanych powinna być nie mniejsza niż 40 mm i nie mniejsza niż 1/6 szerokości półki kształtownika.

W elementach częściowo obetonowanych beton między półkami powinien być trwale połączony z elementem stalowym za pomocą strzemion lub łączników sworzniowych. Strzemiona mogą przechodzić przez otwory w środniku lub być do niego przypawane.

W rurach wypełnionych betonem zwykle nie stosuje się zbrojenia. Może jednak ono być konieczne w przypadku ograniczonych wymiarów przekroju lub ze względu na wymaganą odporność ogniową. Oprócz zbrojenia może być również stosowany sztywny rdzeń stalowy.

Słupy z rur wypełnionych betonem są coraz częściej projektowane ze względu na łatwość wykonania i możliwość skrócenia czasu budowy. Wpływają na to następujące korzystne cechy takich słupów:

- trzon rurowy stanowi gotową formę do wypełnienia mieszanką betonową i zewnętrzne zbrojenie słupa zespolonego,
- przed wypełnieniem betonem słup stalowy może przenosić obciążenia z kilku montowanych kondygnacji budynku,
- zmiana nośności słupa może być dokonana bez zmiany wymiarów zewnętrznych przekroju.

Wadą słupów jest wyższa cena rur w porównaniu z innymi kształtownikami oraz nieco większa pracochłonność wykonywania połączeń.

Udział stali konstrukcyjnej w przenoszeniu obciążeń powinien mieścić się w granicach

$$0,2 \leq \delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \leq 0,9 \quad (9.52)$$

gdzie $N_{pl,Rd}$ — nośność przekroju zespolonego na ściskanie w stanie plastycznym wg wzoru (9.53a).

Obliczenia słupów powinny obejmować:

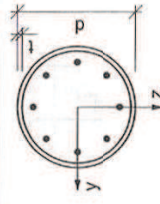
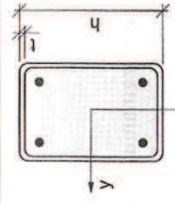
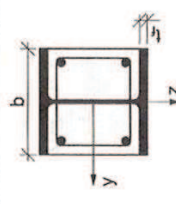
- sprawdzenie nośności elementu,
 - sprawdzenie stateczności miejscowej,
 - sposób wprowadzenia obciążeń,
 - sprawdzenie ścinania między stalą a betonem.
- W normie podano dwie metody obliczania nośności słupów:
- ogólną, której zakres obejmuje elementy o przekrojach niesymetrycznych lub zmieniających się wzdłuż długości słupa,
 - uproszczoną, dotyczącą elementów o bismetrycznym stałym przekroju.

W metodzie ogólnej należy uwzględnić efekty II rzędu, naprężenia rezydualne, imperfekcje geometryczne, miejscową utratę stateczności, zarysowanie betonu,

skurcz i pełzanie betonu oraz uplastycznienie stali konstrukcyjnej i zbrojeniowej. Metoda ta ma niewielkie znaczenie praktyczne i dalej nie będzie omawiana.

Metodę uproszczoną wykorzystuje się w przypadku słupów najczęściej stosowanych, których część stalowa ma przekrój jednolity – walcowany, spawany lub kształtowany na zimno. Wpływ stateczności miejscowej na nośność można pominąć w przekrojach całkowicie obetonowanych, gdzie grubość otuliny jest nie mniejsza niż 40 mm i nie mniejsza niż 1/6 szerokości b pasa, a także w przekrojach, gdzie smukłości ścianek nie przekraczają wartości podanych w tabelicy 9.4.

Tabela 9.4. Maksymalne smukłości ścianek

Przekrój poprzeczny	Max (d/t) , max (h/t) i max (b/t_f)
	$\max \left(\frac{d}{t} \right) = 90 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
	$\max \left(\frac{h}{t} \right) = 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
	$\max \left(\frac{b}{t_f} \right) = 44 \sqrt{\frac{234}{f_y}}$

9.7.2. Obliczanie nośności słupów metodą uproszczoną

1. Nośność przekroju zespolonego na ściskanie w zakresie plastycznym $N_{pl,Rd}$ oblicza się następująco:

— w elementach obetonowanych całkowicie lub częściowo

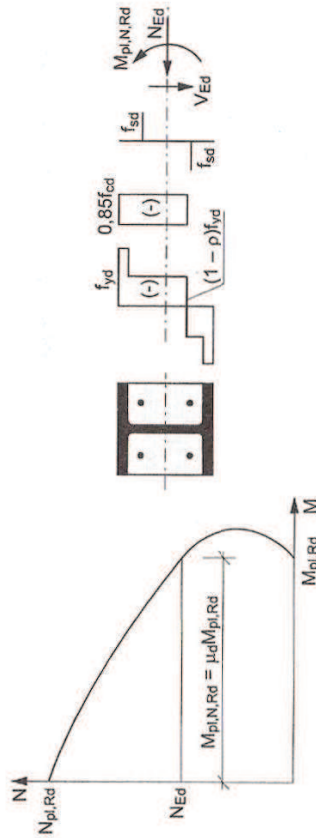
$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + 0,85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (9.53a)$$

— w elementach wypełnionych betonem

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (9.53b)$$

gdzie: A_a, A_c, A_s — pola przekrojów stali konstrukcyjnej, betonu i zbrojenia, f_{yd}, f_{cd}, f_{sd} — wytrzymałości obliczeniowe stali konstrukcyjnej, betonu i zbrojenia.

- Nośność przekroju na jednoczesne ściskanie i zginanie oraz wykres interakcji określa się przy założeniu prostokątnych bloków naprężeń (rys. 9.41), z uwzględnieniem siły poprzecznej V_{Ed} , zgodnie z p. 3. (poniżej). Naprężenia rozciągające w betonie pomijają się.



Rysunek 9.41. Wykres interakcji ściskania i zginania jednokierunkowego

- Wpływ sił poprzecznych na nośność przy jednoczesnym zginaniu i ściskaniu uwzględnia się, jeżeli wartość siły poprzecznej $V_{a,Ed}$ przekracza 50% nośności na ściskanie $V_{pl,a,Rd}$ przekroju stalowego. Jeżeli $V_{a,Ed} > 0,5V_{pl,a,Rd}$, wpływ siły poprzecznej na nośność słupa uwzględnia się zmniejszając wytrzymałość obliczeniową stali do $(1 - \rho)f_{sd}$ na powierzchni ścinania A_1 , gdzie

$$\rho = \left(\frac{2V_{a,Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2$$

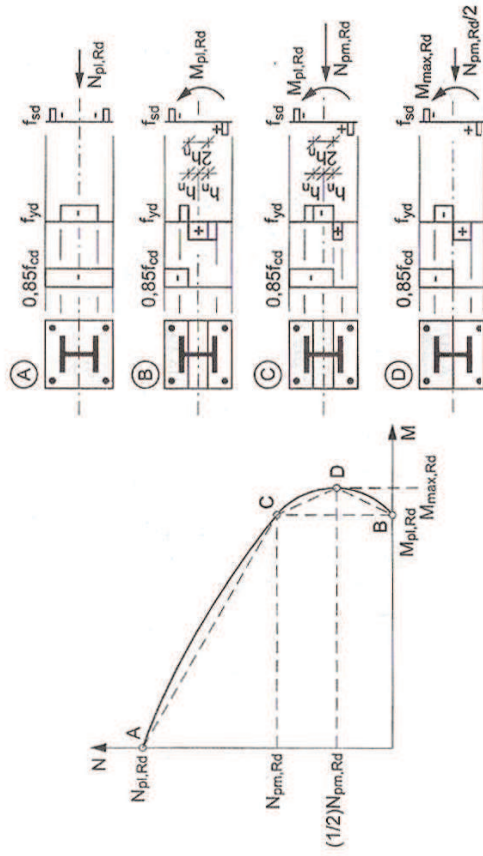
przy czym V_{Rd} — nośność przekroju zespolonego na ścinanie; przy pominięciu betonu $V_{Rd} = V_{pl,a,Rd}$.

Wartość siły $V_{a,Ed}$ nie powinna przekraczać nośności przekroju stalowego na ścinanie $V_{pl,a,Rd}$.

- Dla uproszczenia krzywą interakcji można zastąpić wielobokiem poprowadzonym przez charakterystyczne punkty krzywej (rys. 9.42).

Przyjęto, że przy czystym zginaniu oś obojętna stanu plastycznego leży między pasami dwuteownika, w odległości h_n od osi symetrii przekroju.

Wartości sił i momentów odpowiadających charakterystycznym punktom krzywej interakcji oblicza się następująco:



Rysunek 9.42. Uproszczony wykres interakcji i odpowiadające rozkłady naprężeń w przykładowym przekroju dwuteowym całkowicie obetonowanym

- w punkcie A — $N_{pl,Rd}$ wg wzorów (9.53a) i (9.53b),
- w punkcie C

$$N_{pm,Rd} = A_c(\alpha f_{cd}) \quad (9.54)$$

- w punkcie D

$$M_{max,Rd} = W_{pa}f_{yd} + W_{ps}f_{sd} + 0,5W_{pc}(\alpha f_{cd}) \quad (9.55)$$

- w punktach B i C

$$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - W_{ps}f_{yd} - W_{ps}f_{sd} - 0,5W_{pc}(\alpha f_{cd}) \quad (9.56)$$

gdzie: W_{pa}, W_{ps}, W_{pc} — wskaźniki oporu plastycznego przekrojów stali konstrukcyjnej, zbrojenia i betonu,

W_{ps}, W_{ps}, W_{pc} — wskaźniki oporu plastycznego przekrojów stali konstrukcyjnej, zbrojenia i betonu, mieszczących się w obszarze o wysokości $2h_n$,

$\alpha = 0,85$ w przypadku przekrojów obetonowanych i $\alpha = 1$ w przypadku rur wypełnionych betonem.

Wysokość h_n znajduje się z warunku, że gdy oś obojętna stanu plastycznego zmienia się z położenia D do B, wówczas ośowa siła ściskająca zmienia się z $\frac{N_{pm,Rd}}{2}$ do zera. Zatem

$$\frac{A_c f_{cd}}{2} = 2h_n t_w f_{yd} + h_n (b_c - t_w) f_{cd}$$

skąd

$$h_n = \frac{A_c f_{cd}}{2b_c f_{cd} + 2t_w (2f_{yd} - f_{cd})}$$

gdzie b_c — szerokość obetonowania przekroju stalowego.

5. W ramach o przekroju kołowym wypełnionych betonem można uwzględnić wzrost wytrzymałości betonu z powodu ograniczenia odkształceń poprzecznych, pod warunkiem że smukłość względna $\bar{\lambda} \leq 0,5$ i stosunek mimośrodowi obciążenia e do średnicy d słupa jest $< 0,1$. Wtedy nośność przekroju w zakresie plastycznym oblicza się ze wzoru

$$N_{pl,Rd} = \eta_a A_a f_{yd} + A_c f_{cd} \left(1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_c}{f_{ck}} \right) + A_s f_{sd} \quad (9.57)$$

gdzie: t — grubość ścianki rury

— gdy $e = 0$

$$\eta_a = \eta_{ao} = 0,25(3 + 2\bar{\lambda}), \text{ lecz } \leq 1 \quad (9.58)$$

$$\eta_c = \eta_{co} = 4,9 - 18,5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2, \text{ lecz } \geq 0 \quad (9.59)$$

— gdy $0 < \frac{e}{d} \leq 0,1$

$$\eta_a = \eta_{ao} + (1 - \eta_{ao}) \frac{10e}{d} \quad (9.60)$$

$$\eta_c = \eta_{co} \left(1 - 10 \frac{e}{d} \right) \quad (9.61)$$

— gdy $\frac{e}{d} > 0,1$

$$\eta_a = 1,0 \quad \text{i} \quad \eta_c = 0$$

f_y — nominalna granica plastyczności rury;

pozostałe oznaczenia jak we wzorach (9.53a) i (9.53b).

Smukłość względna

Smukłość względną elementu w rozpatrywanej płaszczyźnie zginania oblicza się z zależności

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \quad (9.62)$$

gdzie: $N_{pl,Rk}$ — nośność charakterystyczna przekroju na ściskanie obliczona wg wzorów (9.53) na podstawie wytrzymałości charakterystycznych,

N_{cr} — siła krytyczna przy wyboczeniu sprężystym określona na podstawie efektywnej sztywności giętej $(EI)_{eff}$.

Efektywna sztywność gięta

Przy określaniu smukłości względnej $\bar{\lambda}$ i siły krytycznej N_{cr} wartość charakterystyczną sztywności przekroju oblicza się ze wzoru

$$(EI)_{eff} = E_a I_a + E_s I_s + 0,6 E_{cm} I_c \quad (9.63)$$

gdzie: I_a , I_c , I_s — momenty bezwładności przekroju stali konstrukcyjnej, niezarysowanego betonu i zbrojenia w rozpatrywanej płaszczyźnie zginania.

Przy określaniu sił wewnętrznych wartość obliczeniowa sztywności

$$(EI)_{eff,II} = 0,9(E_a I_a + E_s I_s + 0,5 E_{cm} I_c) \quad (9.64)$$

Wpływ obciążeń długotrwałych na sztywność giętą przekroju można uwzględnić przyjmując zamiast E_{cm} wartość $E_{c,eff}$, wg zależności

$$E_{c,eff} = E_{cm} \frac{1}{1 + \frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \phi_t} \quad (9.65)$$

gdzie: ϕ_t — współczynnik pełzania,

N_{Ed} — obliczeniowa siła ściskająca od obciążeń całkowitych,

$N_{G,Ed}$ — obliczeniowa siła ściskająca od obciążeń stałych.

Wpływy efektów II rzędu i imperfekcje

Wpływy efektów II rzędu pomija się, jeżeli zwiększenie sił wewnętrznych i momentów na skutek przemieszczeń obliczonych wg teorii I rzędu jest mniejsze niż 10%. Wpływy efektów II rzędu można uwzględnić zwiększając największy obliczeniowy moment zginający I rzędu M_{Ed} za pomocą współczynnika

$$k = \frac{\beta}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,eff}}} \geq 1 \quad (9.66)$$

gdzie: $N_{cr,eff}$ — siła krytyczna w rozpatrywanym kierunku wybożenia obliczona na podstawie obliczeniowej sztywności przekroju $(EI)_{eff,II}$ i długości wybożeniowej równej długości słupa,

β — współczynnik momentu zginającego podany w PN-EN 1994-1-1/Tablica 6.4.

Imperfekcje strukturalne i geometryczne można zastąpić równoważną wartością początkowego wygięcia elementu (imperfekcją elementu). Równoważne im-

perfekcje elementu i odpowiadające im krzywe wyobczeniowe podano w PN-EN 1994-1-1/Tabela 6.5, gdzie L oznacza długość słupa, a $\rho_s = \frac{A_s}{A_c}$.

Nośność słupów osiowo ściskanych

Słup ma wystarczającą nośność, jeżeli w przypadku obu osi przekroju jest spełniony warunek

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (9.67)$$

gdzie: N_{Ed} — obliczeniowa siła ściskająca,

$N_{pl,Rd}$ — nośność przekroju zespolonego na ściskanie w zakresie plastycznym wg wzorów (9.53a) i (9.53b),

χ — współczynnik redukcyjny dla stosowanej postaci wyobczenia podany w PN-EN 1993-1-1/6.3.1.2, w zależności od względnej smukłości $\bar{\lambda}$.

Nośność słupów jednokierunkowo mimośrodowo ściskanych

Warunek nośności (por. krzywa interakcji – rys. 9.41) ma postać

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,N,Rd}} = \frac{M_{Ed}}{\mu_d M_{pl,Rd}} \leq \alpha_M \quad (9.68)$$

gdzie: M_{Ed} — maksymalny obliczeniowy moment zginający w słupie, z uwzględnieniem imperfekcji i wpływów II rzędu (jeśli występują),

$M_{pl,N,Rd}$ — nośność obliczeniowa na zginanie przekroju zespolonego w zakresie plastycznym, z uwzględnieniem siły ściskającej, równa $\mu_d M_{pl,Rd}$ (por. rys. 9.41),

$M_{pl,Rd}$ — nośność przekroju na zginanie w zakresie plastycznym (por. punkt B – rys. 9.42).

Współczynnik α_M należy przyjmować następująco:

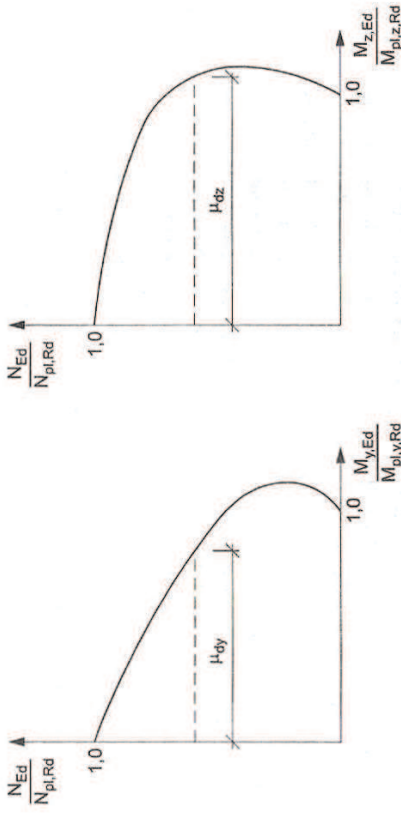
— dla gatunków stali od S235 do S355 włącznie $\alpha_M = 0,9$,

— dla gatunków S420 i S460 $\alpha_M = 0,8$.

Współczynnik $\mu_d = \mu_{dy}$ lub μ_{dz} (rys. 9.43) odnosi się do obliczeniowej nośności przekroju na zginanie w zakresie plastycznym $M_{pl,Rd}$ w rozpatrywanej płaszczyźnie zginania. Wartość $\mu_d > 1$ można przyjmować, gdy moment zginający M_{Ed} jest spowodowany działaniem siły N_{Ed} .

Warunki wprowadzania obciążeń i zespolenia stali z betonem

W strefach wprowadzania obciążeń oraz wzdłuż długości słupów poddanych działaniu sił poprzecznych należy zapewnić przekazywanie podłużnych naprężeń ściągających między stalą a betonem. Wykorzystuje się w tym celu naturalną przy-



Rysunek 9.43. Współczynniki μ_d przy ściskaniu i zginaniu dwukierunkowym

czepność obu materiałów i w razie potrzeby stosuje łączniki. Łączniki między stalą a betonem nie są wymagane, jeżeli naprężenia styczne w płaszczyźnie zespolenia nie przekraczają wartości podanych w tabelicy 9.5.

Tabela 9.5. Wytrzymałości obliczeniowe na ścinanie τ_{Rd}

Typ przekroju poprzecznego	τ_{Rd} , N/mm ²
Całkowicie obetonowane	0,30
Rurowe okrągłe wypełnione betonem	0,55
Rurowe prostokątne wypełnione betonem	0,40
Stopki elementów częściowo obetonowanych	0,20
Środniki elementów częściowo obetonowanych	0,00

Szczegółowe wymagania i zalecenia konstrukcyjne w tym zakresie podano w PN-EN 1994-1-1/6.7.4 i 6.7.5.

Stupy z rur wypełnionych betonem oraz z dwuteowników częściowo obetonowanych mogą być wykonywane jako prefabrykаты stalowo-betonowe [4].

Normy i bibliografia

Normy

PN-EN 10025

Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych.

PN-EN 10147

Taśmy i blachy ze stali konstrukcyjnej ocynkowanej ogniotwórczo w sposób ciągły. Warunki techniczne dostawy.