Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Projektowanie konstrukcji stalowych

Jan Żmuda

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

Spis rozdziałów

1. **STAL, PRODUKCJA, WŁAŚCIWOŚCI, WYROBY**
2. **PODSTAWY PROJEKTOWANIA**
3. **ELEMENTY ROZCIĄGANE**
4. **ELEMENTY ŚCISKANE, WYBOCZENIE**
5. **POŁĄCZENIA ELEMENTÓW ROZCIĄGANYCH**
6. **DŹWIGARY KRATOWNICOWE**
7. **SŁUPY STALOWE**
8. **POPRZECZNE UKŁADY NOŚNE SŁUPOWO - RYGLOWE**

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

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

Wartości stałych materiałowych stali konstrukcyjnych są następujące:

- moduł sprężystości podłużnej (Younga):

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

- moduł sprężystości poprzecznej (Kirchoffa):

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

- sprężysty współczynnik Poissona: $\nu = 0{,}3$,

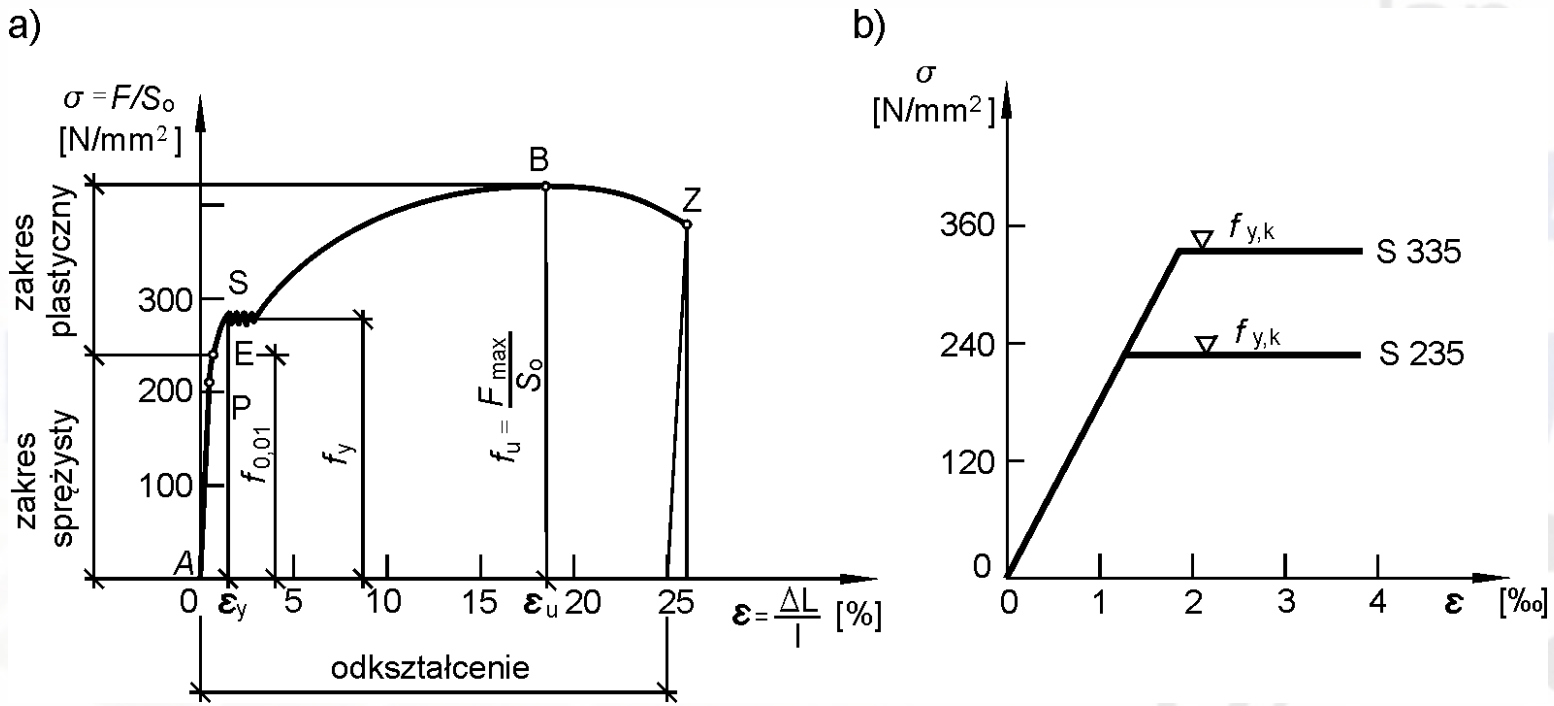
- współczynnik rozszerzalności liniowej cieplnej: $\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{K}$,

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

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 rysunku1.1b 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 określać może punkt E opisujący naprężenie $f_{0,001}$ 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.

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 rys. 1.1b oznaczono charakterystyczną wartość granicy plastyczności $f_{y,k} = f_y / \gamma_M$, γ_M - współczynnik materiałowy, który wg 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.

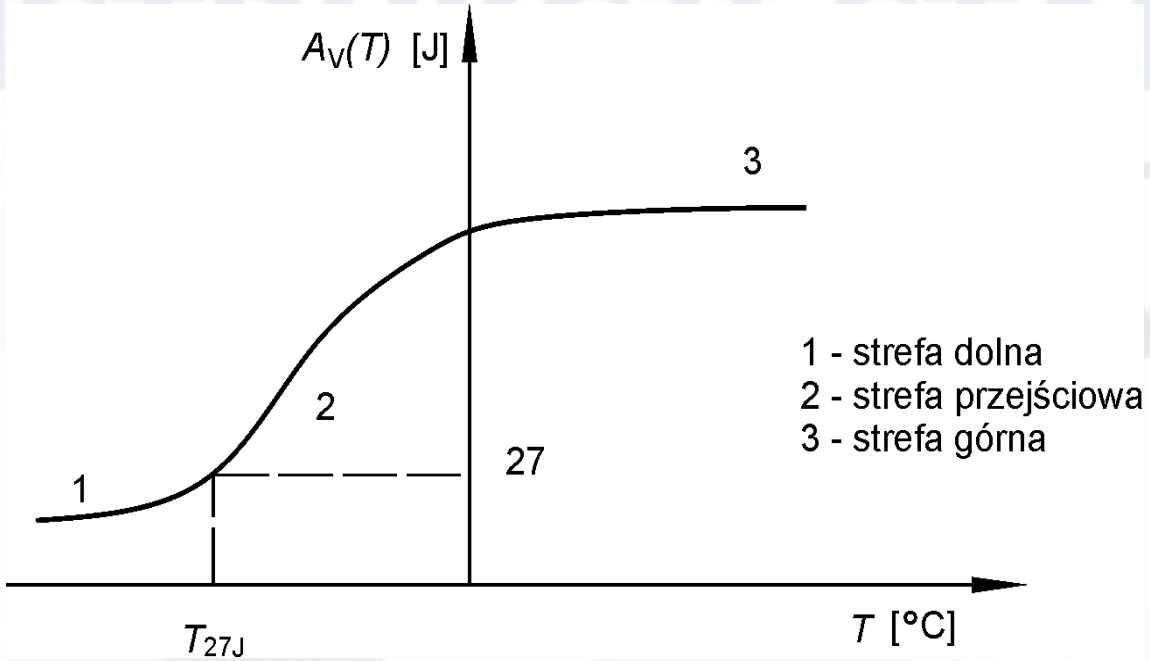
Zgodnie z normą PN-EN 1993-1-1 wymaganą minimalną ciągliwość stali określają warunki:

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

Jan Żmuda PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

1.2.2.3. Udarność stali – odporność na kruche pękania

Miarą udarności stali jest wartość pracy w J (Joule'ach) 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 także niższa (rys. 1.2). Próby udarności wykonuje się na młotach Charpy'ego.

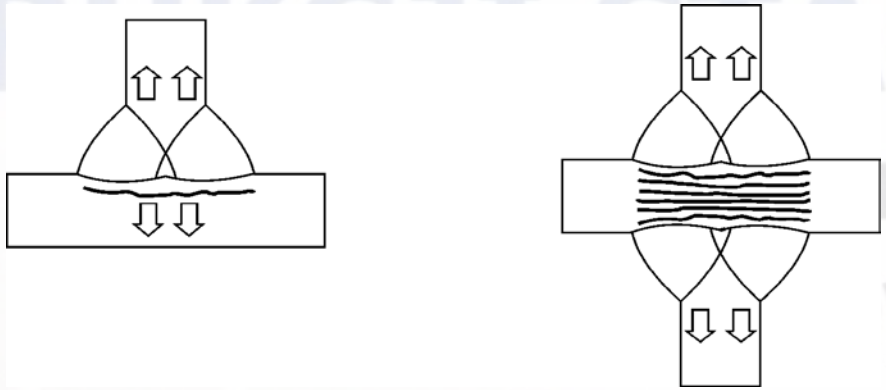


Rys. 1.2. Wpływ temperatury T na wartość pracy łamania $A_V(T)$

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

1.2.2.4. Odporność na pękanie rozwarstwiające

Środniki kształtowników stalowych, a zwłaszcza blachy, przy 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) jest uzależniona od stopnia uspokojenia ciekłej stali. Zasady doboru stali ze względu na ciągliwości między warstwowe dotyczą przede wszystkim połączeń spawanych. Zasady określania ryzyka pęknięć lamelarnych określa norma PN-EN 1993-1-10.

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:

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

W hutnictwie krajowym i europejskim produkowane są stale na potrzeby budownictwa i przemysłu, które są oznakowane cyframi i liczbami – symbolami opisującymi: gatunek stali, właściwości mechaniczne i technologiczne oraz użytkowe, powiązane ściśle z gotowymi wyrobami dostarczanymi 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 [J], Joule'a,

K = 40 [J], Joule'a,

L = 60 [J], Joule'a,

– temperatura łamania próbki T – oznaczono literą R i cyframi 0÷6:

R = 20^0C,

0 = 0^0C,

2 = -20^0C,

3 = -30^0C,

4 = -40^0C,

5 = -50^{0}C,

6 = -60^{0}C,

– właściwości lub przeznaczenie szczególniejsze:

C – do formowania na zimno,

H – na kształtowniki zamknięte,

L – do stosowania w niskich temperaturach,

M – walcowana termomechanicznie,

N – normalizowana,

T – stal do produkcji rur,

Q – do ulepszania cieplnego,

W – stal odporna na korozję atmosferyczną,

– podwyższone odporności na pękania rozwarstwiające (lemalarne):

+Z15 – minimalne przewężenie 15%,

+Z25 – minimalne przewężenie 25%,

+Z35 – minimalne przewężenie 35%,

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Zamawiający dany wyrób stalowy tworzy z tych oddzielnych symboli uporządkowany ich układ, charakteryzujący jej właściwości. 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: S235 JRW i S355K2L+Z15.

Jan Żmuda PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, podciągi

Tablica 1.1.

Objaśnienia znaczeń układów symboli

Układ symboli	**Gatunek stali**	**Minimalna granica plastyczności f_y [N/mm^2]**	**Praca łamania próbki $A_V(T)$ [J]**	**Temperatura łamania T [^{0}C]**	**Właściwości przeznaczenia szczególne**	**Odporność podwyższona na pękania rozwarstwiające**
S235JRW	S – stal konstrukcyjna	235	A_V = J = 27 [J]	T = R = +20^{0}C	W – stal odporna na korozję atmosferyczną	-
S355K2L+Z15	S – stal konstrukcyjna	355	A_V = J = 40 [J]	T = 2 = –20^{0}C	L – stal do stosowania w niskich temperaturach	+Z15 – podwyższona odporność na pękanie rozwarstwiające

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

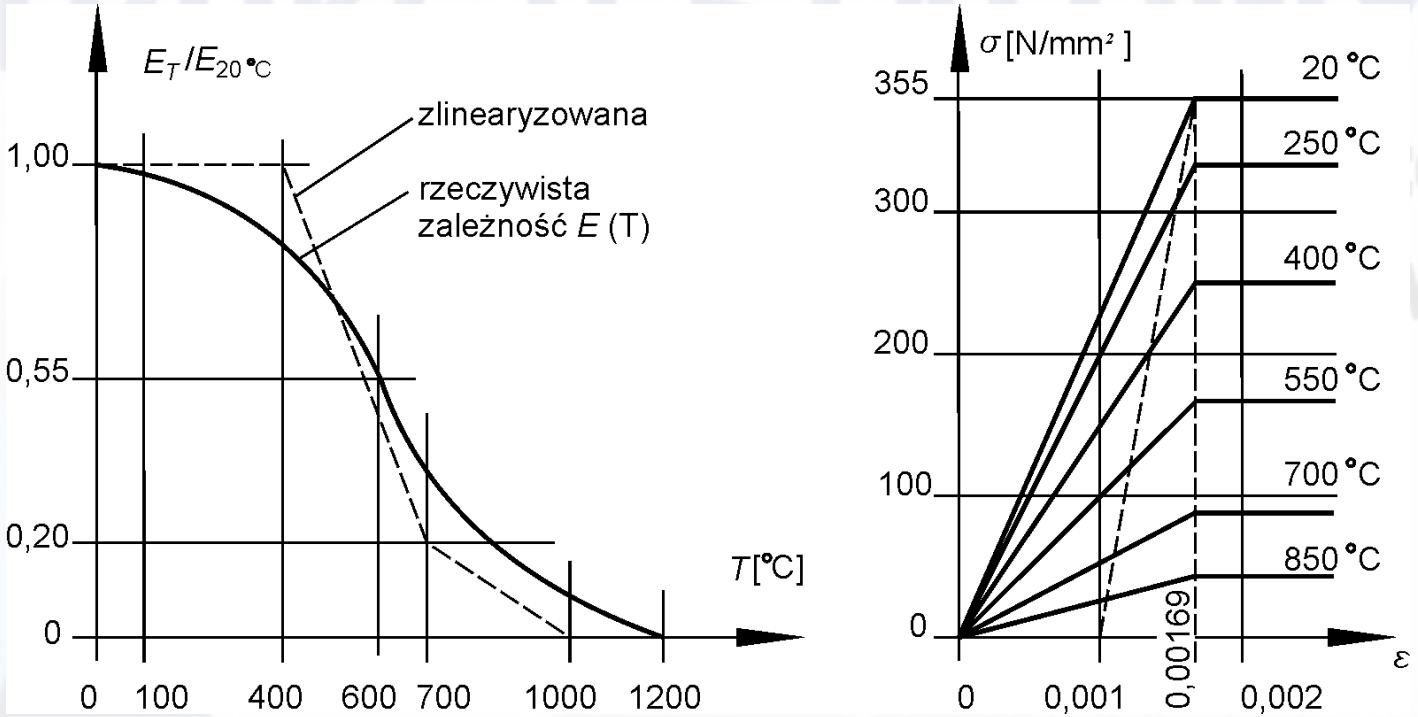
Gatunek stali	Udział [%] w stali				Granica plasty czności f_y [N/mm^2]	Granica wytrzy- małości f_u [N/mm^2]	Minimalne wydłużenie %	Sposób odtlenienia
	węgiel C	potas P	siarka S	azot N				
S235JR	0,17-0,20	0,045	0,045	0,007	235	360	26	pół- uspokojona
S235J2	0,17	0,035	0,035	0,09	235	360	26	uspokojona
S355J2	0,20	0,035	0,035	-	355	510	22	uspokojona
S275	-	-	-	-	275	430	22	-
S450	-	-	-	-	440	550	17	-

1.6. Właściwości mechaniczne stali w różnych temperaturach

1.6.1. Temperatury klimatyczne

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

- klimatycznego,
- pożarowego,
- technologicznego.

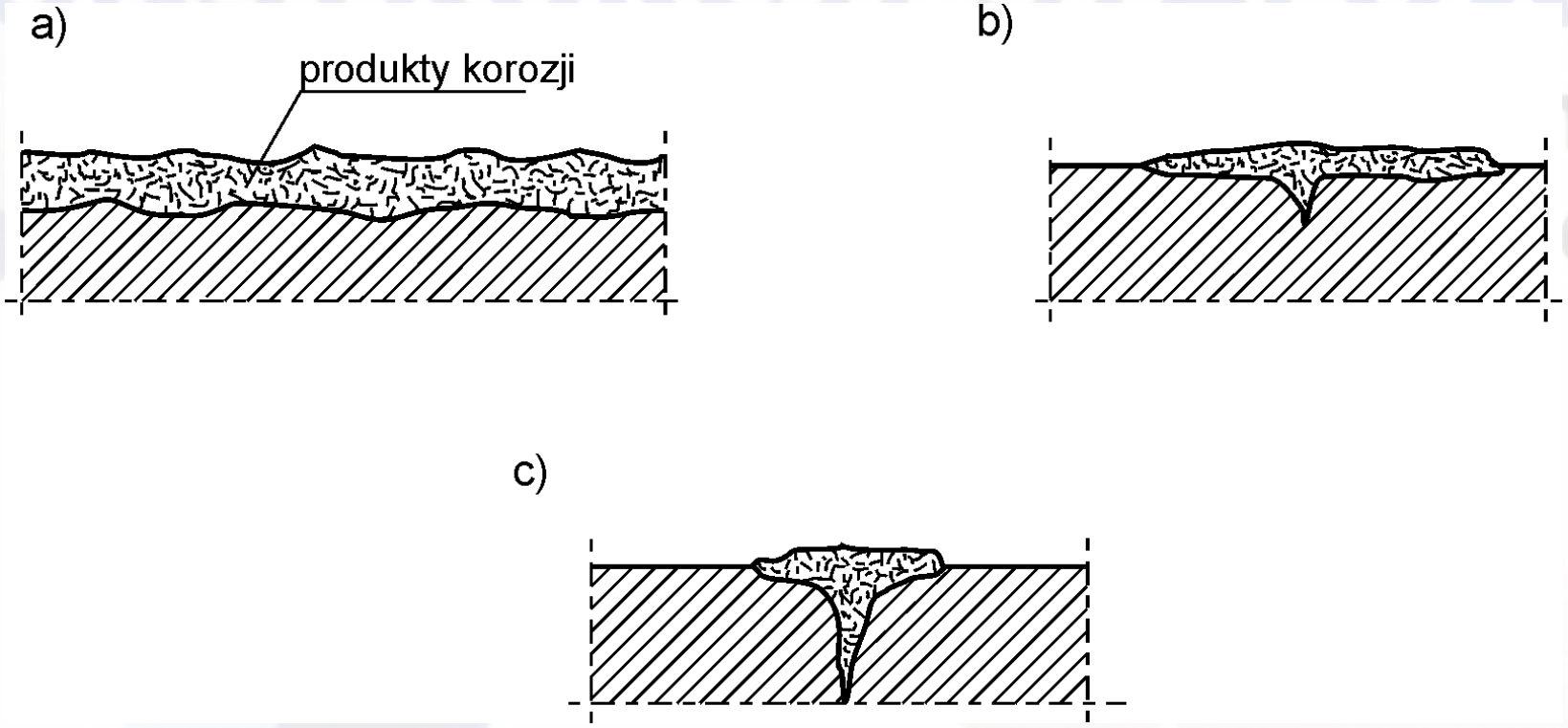


Rys. 1.7. Wpływ wzrostu temperatury na wartości modułu E i wytrzymałości stali konstrukcyjnej S235

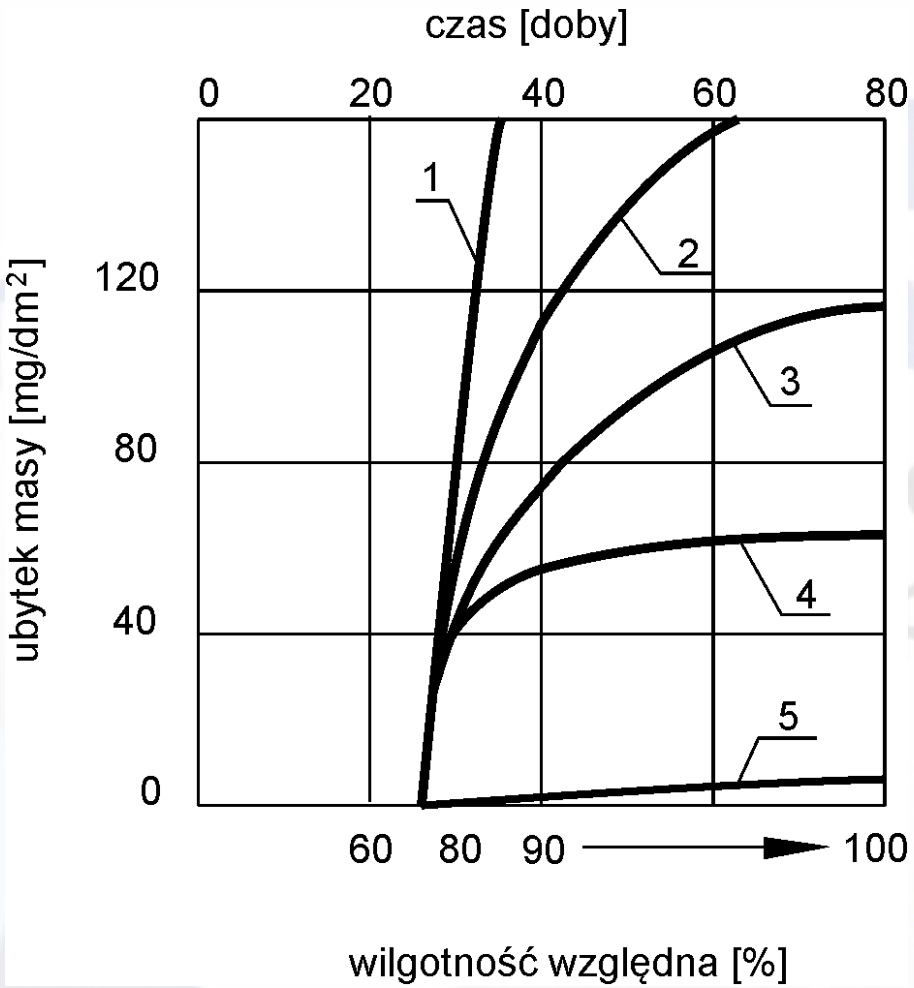
1.7. Korozja stali

Ze względu na wynik oddziaływania rozróżnia się następujące rodzaje korozji:

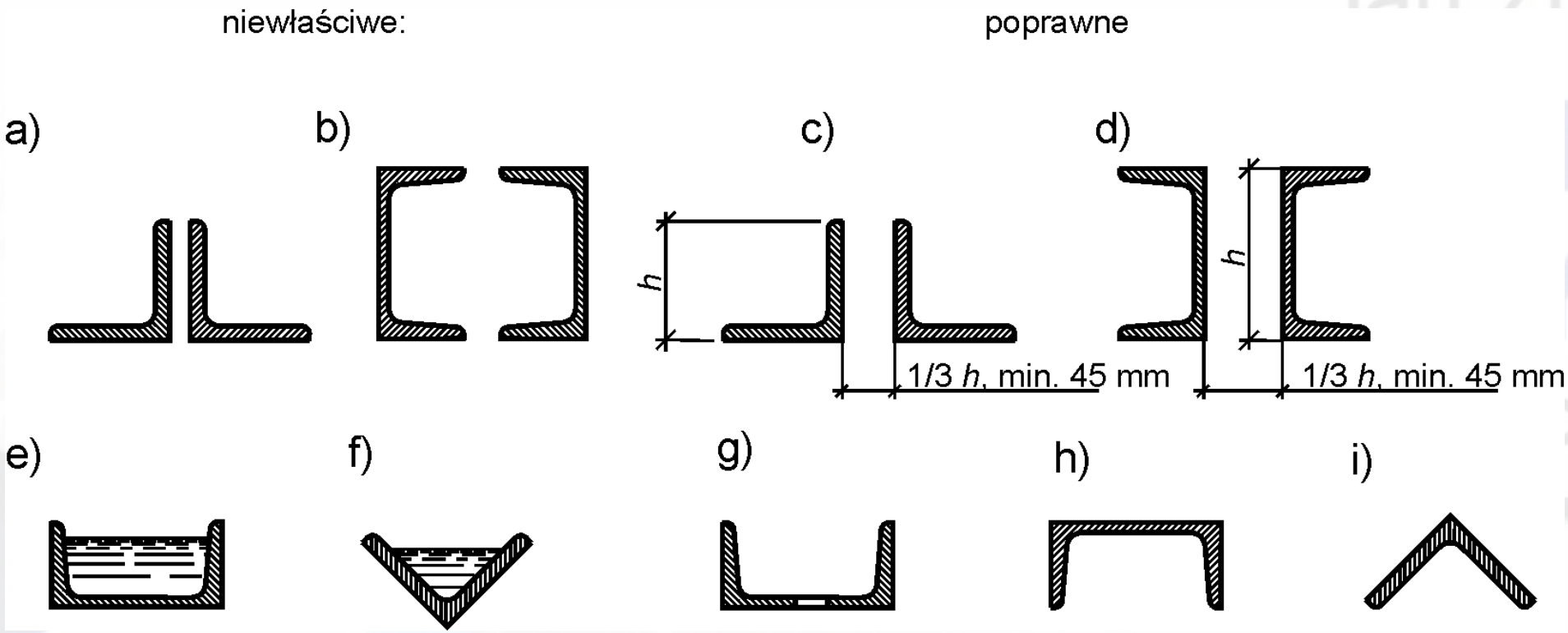
- korozję równomierną, zachodzącą na całej powierzchni elementów metalowych (rys. 1.9a),
- korozję wżerową, która powstaje tylko w pewnych miejscach powierzchni, wskutek czego tworzą się w tych miejscach zagłębienia zwane wżerami (rys. 1.9b, c); wżery są często wskrośne,



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



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

1.9.4. Rodzaje złącz spawanych i spoin

Złącza spawane wyróżnia się w zależności od geometrycznych usytuowań spawanych elementów konstrukcyjnych i kształtów przygotowanych rowków spawalniczych.

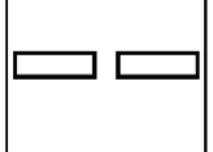
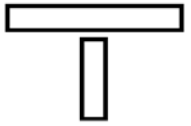
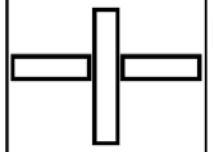
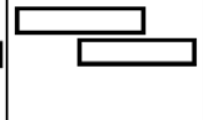
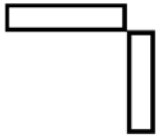
W tablicy 1.3 zestawiono najczęściej stosowane rodzaje styków elementów spawanych i przyporządkowane tym złączom nazwy spoin. Do łączenia takich elementów stalowych projektuje się spoiny czołowe lub alternatywnie spoiny pachwinowe.

W normie PN-EN 1993-1-8 wyszczególnia się następujące rodzaje spoin:

- czołowe z pełnym lub niepełnym przetopem,
- pachwinowe ciągłe lub przerywane,
- pachwinowe: obwodowe, otworowe (okrągłe lub owalne),
- szerokobruzdowe.

Tablica 1.3.

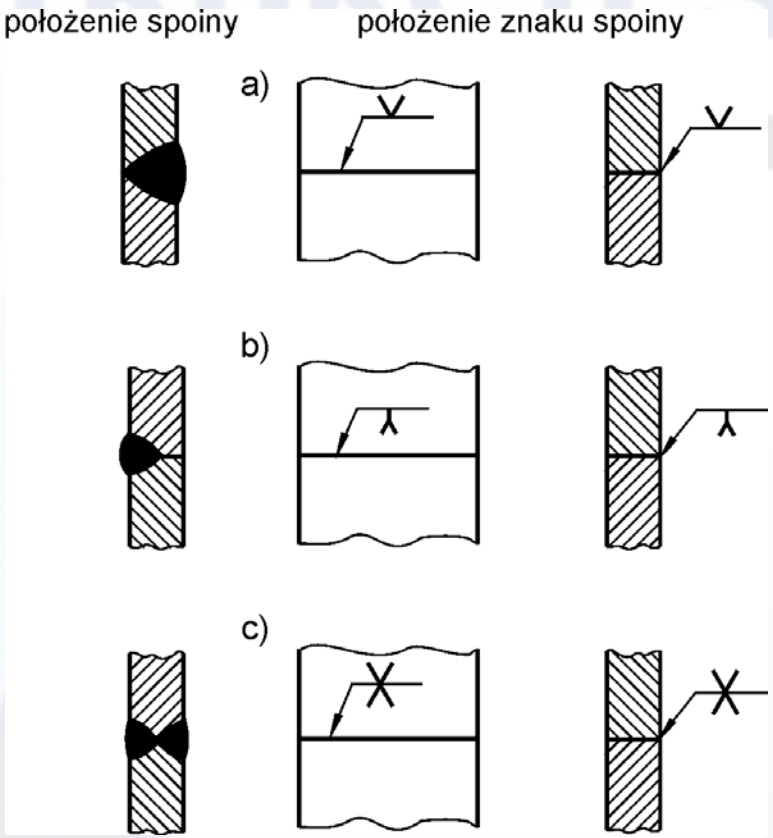
Rodzaje styków i przyporządkowane nazwy spoin

nazwa złącza	styk doczołowy	styk teowy	styk krzyżowy	styk zakł.	styk kątowy	węzeł krat.
widok złącza						
rodzaj spoiny	czołowa	pachwinowa (czołowa)	pachwinowa (czołowa)	pachwinowa	czołowa (pachwinowa)	pachwinowa

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

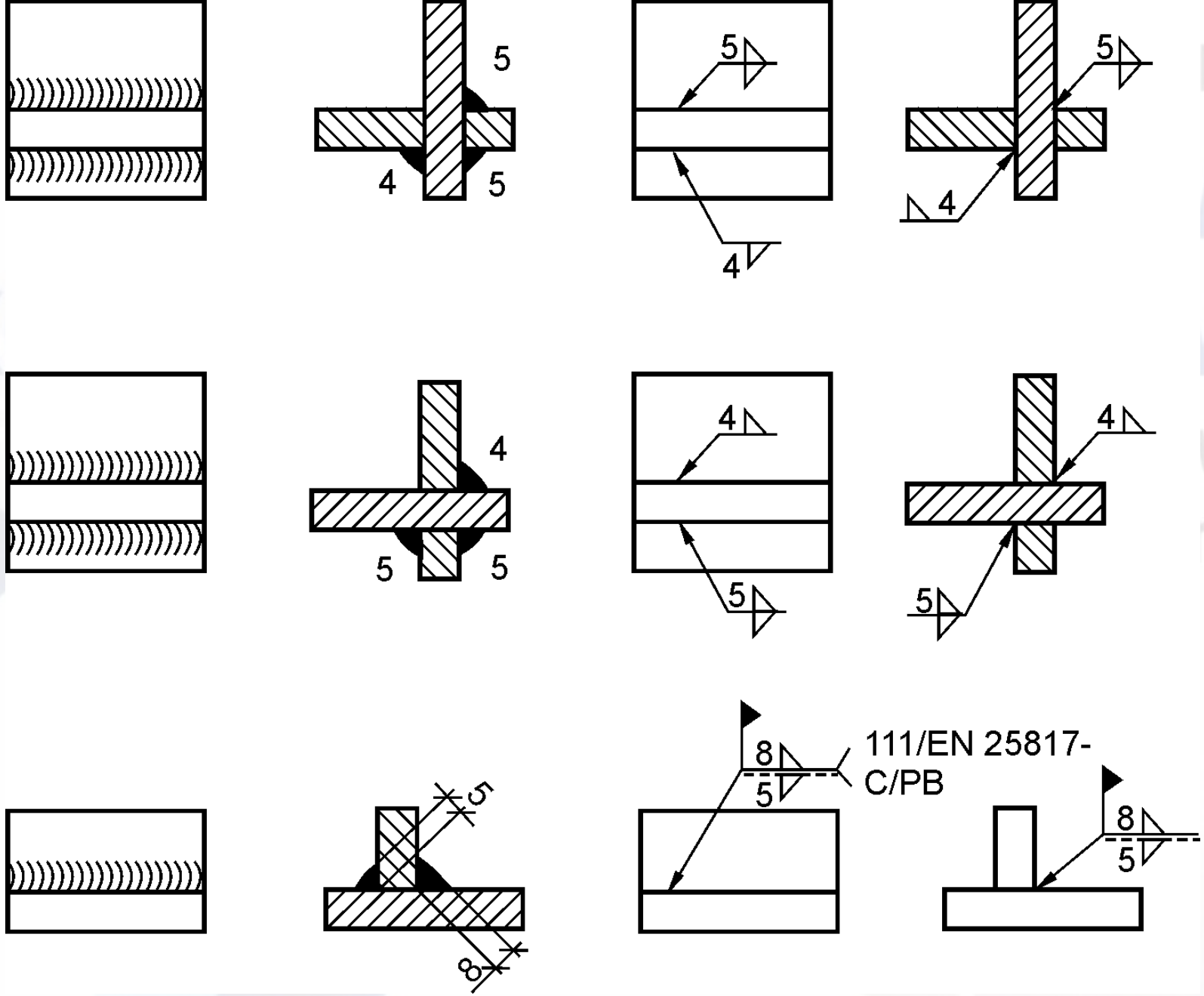
Strzałkę znaku spoiny umieszcza się:

– nad linią, jeżeli lico spoiny poziomej znajduje się po tej samej stronie złącza co strzałka,
– pod linią (odwrócony), jeżeli lico spoiny poziomej znajduje się po odwrotnej stronie złącza co strzałka (strzałka oznacza wtedy grań spoiny),
– na linii dla spoin dwustronnych (rys. 1.25c) np. X, K.



Rys. 1.25. Zasady umieszczania strzałki odniesienia

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
ry kratownicowe,
słupy, ramownice



Rys. 1.26. Oznaczanie spoin pachwinowych złącz krzyżowych i teowych

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

1.10. Śruby

1.10.1. Rodzaje i klasy śrub

W budownictwie stosuje się śruby:

- zwykłe, sześciokątne,
- pasowane, sześciokątne,
- wysokiej wytrzymałości – sprężające,
- zaciskające – bolce zaciskowe.

Śruby stosuje się, jeśli:

- łączy się elementy lane, trudnospawalne,
- spawanie jest utrudnione (scalanie konstrukcji na wysokościach),
- w stykach montażowych łączących elementy wysyłkowe (montaż wymuszony),
- wymagane są złącza rozłączne.

Tablica 1.6.

Klasy śrub i wartości nominalne granicy plastyczności f_{yb} i granicy wytrzymałości na rozciąganie f_{ub}

Klasa śruby	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} [N/mm^2]	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} [N/mm^2]	400	400	500	500	600	800	1000

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz. 1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Śruby sześciokątne pasowane

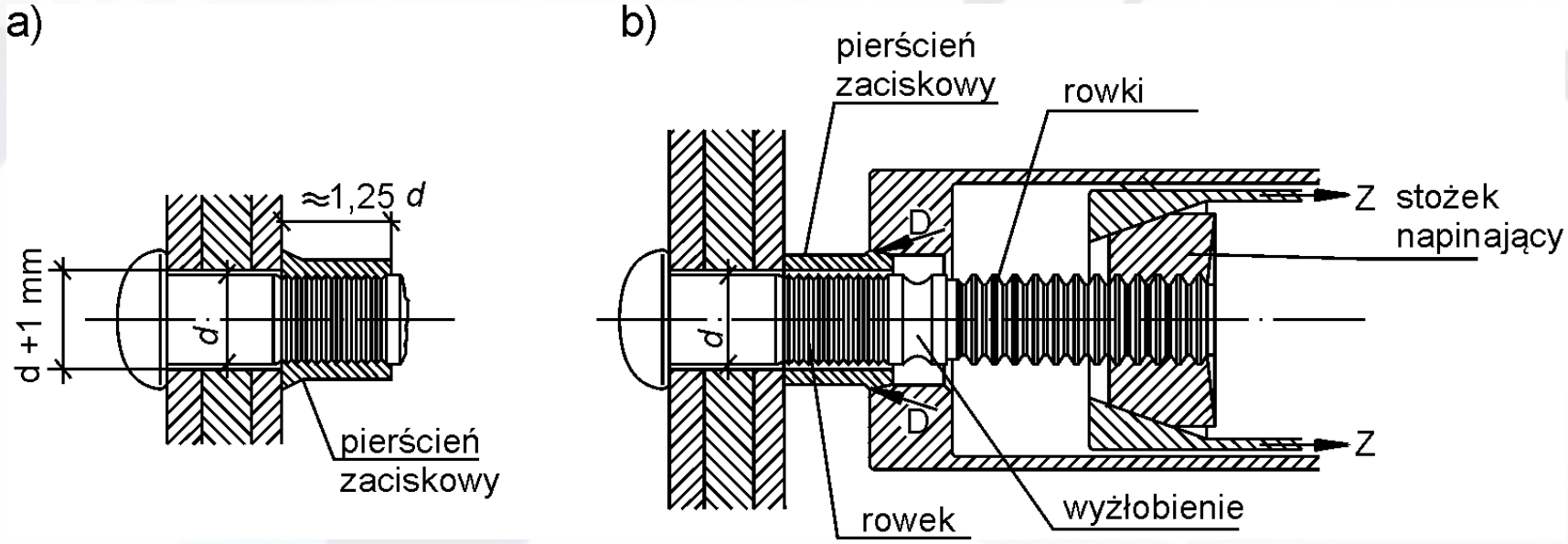
Montaż śrub pasowanych odbywa się przy zasadzie tzw. stałego otworu. Kształt śruby pasowanej pokazano na rys. 1.28b. Cechą charakterystyczną śruby pasowanej jest to, że średnica nominalna trzpienia części niegwintowanej d jest mniejsza (o około 0,3 mm) od średnicy otworu d_o i większa od średnicy części gwintowanej trzonu d_1. Średnicą śruby pasowanej jest średnica części gwintowanej, np. M20 oznacza, że średnica rdzenia gwintowanego jest 20 mm, a średnica trzonu 20,7 mm.

Śruby pasowane są droższe od zwykłych. Stosuje się w połączeniach rygli i słupów ram wrażliwych na niestateczności (przechyły). Brak luzów między otworami a trzpieniami śrub ogranicza wzajemne przemieszczanie się elementów i zwiększa stateczność ustroju. Wymiary śrub są znormalizowane i są określane w normach europejskich i krajowych.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, ownice

Śruby zaciskające – Huck – bolce [23]

Śruby zaciskające (rys. 1.29) są łącznikami wprowadzonymi na rynek handlowy w okresie ostatniego trzydziestolecia. Są łącznikami o funkcjach zbliżonych do funkcji nitów i śrub sprężających. Stal śruby winna być klasy 8.8, 10.9. Mogą być stosowane w ustrojach pracujących statycznie.



Rys. 1.29. Bolec zaciskowy: a) bolec zamontowany, b) schemat montażu bolca

2.1. Wymagania niezawodności, jakość i kontrola wg PN-EN-1990

2.1.1. Wymagania niezawodności – stany graniczne

Elementy stalowe i ich scalone układy należy projektować i wykonać w sposób niezawodny, aby w planowanym okresie użytkowania przejmowały obciążenia od ciężarów własnych, klimatycznych i technologicznych, czyli aby ich nośność, użytkowalność i trwałość była niezawodna.

Planowany okres użytkowania:

– dla konstrukcji tymczasowych – 10 lat,
– dla budynków przemysłowych, użyteczności publicznej ze szkieletami stalowymi – 50 ÷ 80 lat,
– dla obiektów inżynierskich (mosty, wiadukty) – 100 lat.

Niezawodność konstrukcji stalowych osiąga się poprzez stosowanie w obliczeniach, zgodnie z normą [N18], odpowiednich zapasów bezpieczeństwa, a ponadto aplikowanie przepisów „Prawa budowlanego”.

Kryteria niezawodności, zgodnie z normami Eurokod, osiąga się poprzez stosowanie w projektowaniu zasad metody stanów granicznych i współczynników częściowych.

W projektowaniu konstrukcji stalowych według metody stanów granicznych rozróżnia się:

– stany graniczne nośności,
stany graniczne użytkowalności.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Obliczeniowe kryteria niezawodności w stanach granicznych nośności mają ogólną postać:

$$\frac{E_d}{R_d} \leq 1, \tag{2.1}$$

gdzie:

E_d - wartość obliczeniowa efektów działania obciążeń,

R_d - wartość obliczeniowa odpowiedniej nośności przekroju elementu konstrukcyjnego.

Obliczeniowe efekty oddziaływań określono związkiem:

$$E_d = E\left(\gamma_{F_i}, F_{rep,i}\right), \tag{2.2}$$

gdzie:

$\gamma_{F_i} = \gamma_G, \gamma_Q, \gamma_P$ - współczynniki częściowe od ciężarów własnych, zmiennych,

$F_{rep.}$ - wartość reprezentatywna obciążenia:

$$F_{rep} = \psi \, F_K, \tag{2.3}$$

gdzie: F_K - wartość charakterystyczna obciążenia (obciążenie normowe),

ψ - współczynnik stosowany w kombinacjach obciążeń.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Wartości obliczeniowe nośności R_d zależą od rodzaju obliczanej nośności przekroju (rozciąganie, ściskanie, zginanie, ścinanie), współczynników stateczności, współczynników materiałowych γ_M:

$$R_d = f_y \; x_i \; \chi_i / \gamma_{M_i} , \tag{2.4}$$

gdzie:

f_y - granica plastyczności stali,

x_i - parametr przekroju poprzecznego (pole, wskaźnik wytrzymałości),

χ_i - współczynnik niestateczności,

γ_{M_i} - współczynniki materiałowe: $\gamma_{M1} = 1$, $\gamma_{M2} = 1{,}25$.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

2.1.1. Poziomy niezawodności

Wymagania techniczne związane z wytwarzaniem i scalaniem konstrukcji określono w normie PN-EN 1990-2. Wymaganie są uwarunkowane:

- klasą niezawodności wykonania (EXC: 1, 2, 3, 4) ustalaną przez projektanta dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych lub całej konstrukcji,
- klasą konsekwencji zniszczenia (CCX),
- kategorią użytkowania (SC1 lub SC2),
- kategorią produkcji (PC1 lub PC2).

Dla konstrukcji powszechnie wznoszonych z klasą konsekwencji zniszczenia CC2 z obciążeniami przeważająco statycznymi (SC1) przyjmuje się klasę wykonania EXC2.

Klasa niezawodności wykonania konstrukcji i związane z nią poziomy zapewnienia jakości zarówno na etapie projektowania, jak też w wykonawstwie, powinna być uzgadniana między inwestorem a projektantem i określona w specyfikacji wykonawczej.

2.3.5. Kombinacje oddziaływań w stanach granicznych nośności (STR) i użytkowalności

Kombinacje równocześnie działających obciążeń stałych i zmiennych w stanie granicznym zniszczenia (STR) w trwałych sytuacjach obliczeniowych mają postać:

$$E_d = \sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i}\, G_{k,i} + \gamma_{Q,1}\, Q_{k,1} + \sum_{j>1} \gamma_{Q,j}\, \psi_{o,j}\, Q_k\,, \qquad (2.8)$$

gdzie:

$\gamma_G = \gamma_{G,\mathrm{sup}} = 1{,}35$ lub $\gamma_G = \gamma_{G,\mathrm{inf}} = 1$,

$\gamma_{Q,1}\, Q_{k,1}$ - wiodące (główne) oddziaływanie zmienne,

$\gamma_{Q,1} = 1{,}5$,

$\sum_{j>1} \gamma_{Q,j}\, \psi_{o,j}\, Q_k$ - jest sumą obciążeń towarzyszących, przy czym

$\gamma_{Q,j} = 1{,}5$,

$\psi_{o,j}$ - współczynniki kombinacyjne.

PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Kombinacja oddziaływań w trwałych sytuacjach obliczeniowych w stanie granicznym użytkowalności może być wyrażona wzorem:

$$\sum_{i\geq 1} G_{k,i} + Q_{k,1} + \sum_{j>1} \psi_{o,j}\, Q_{k,j}\,, \qquad (2.9)$$

gdzie:

$G_{k,i}$ - i-te obciążenie charakterystyczne stałe,

$Q_{k,1}, Q_{k,j}$ - odpowiednio wiodące kolejne obciążenia zmienne.

Współczynniki kombinacyjne ψ_o do obciążeń zmiennych towarzyszących zaleca się przyjmować:

- dla obciążeń użytkowych (I): $\psi_{o,I} = 0{,}7$ lub 1 (kat. E bud.),
- dla obciążeń wiatrem (W): $\psi_{o,W} = 0{,}6$,
- dla obciążeń śniegiem (S): H < 1000 m n.p.m., $\psi_{o,S} = 0{,}5$,

  H > 1000 m n.p.m., $\psi_{o,S} = 0{,}7$,
- dla obciążeń termicznych: $\psi_o = 0{,}6$.

Jan Żmuda PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

2.4. Klasyfikacja przekrojów poprzecznych

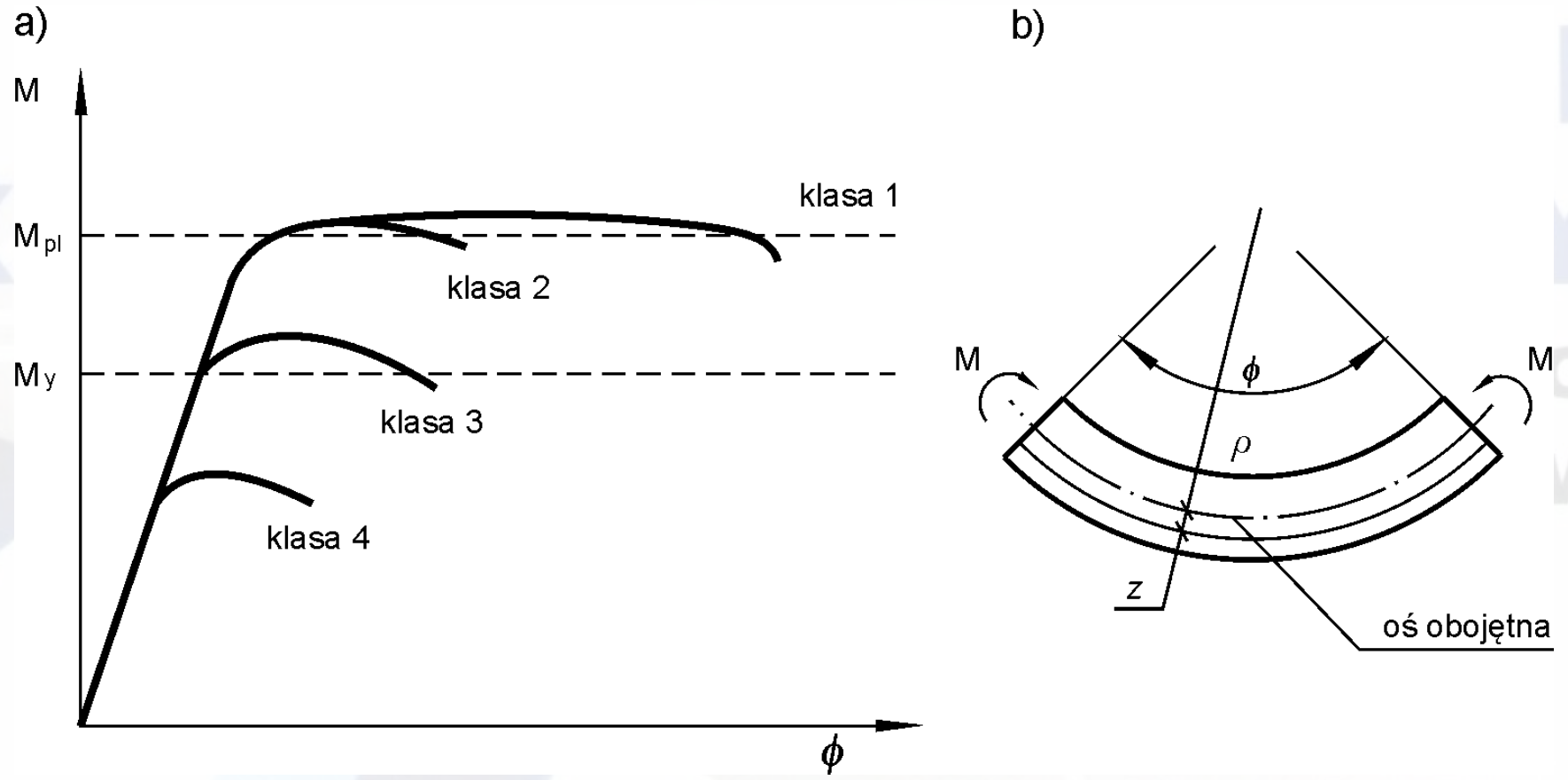
Wskaźnikiem umożliwiającym ocenę tego stopnia wrażliwości lub odporności jest klasa przekroju, a miarą tego wskaźnika jest smukłość.

W Eurokodzie 3 [N30, N32] przekroje podzielono na cztery klasy, przy czym ścianki klas 1, 2 i 3 są zaliczane do krępych, a klasy 4 do cienkościennych. Cztery klasy przekrojów definiuje się w następujący sposób:

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

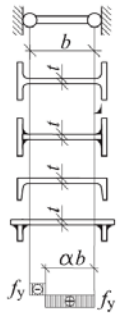
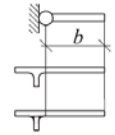
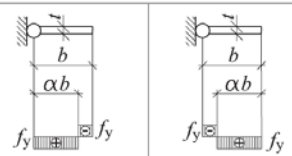
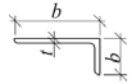
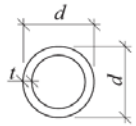
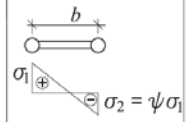
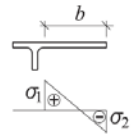
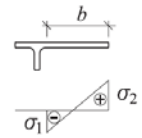
- **klasa 1 –** przekroje, które osiągają nośność przegubu plastycznego i wykazują przy tym zdolność do obrotu niezbędną do plastycznej redystrybucji momentów,
- **klasa 2 –** przekroje, które osiągają nośność przegubu plastycznego, lecz wskutek niestateczności miejscowej (w stanie plastycznym) wykazują ograniczoną zdolność do obrotu,
- **klasa 3 –** przekroje, które wykazują nośność nie mniejszą niż to wynika z początku uplastycznienia strefy ściskanej, lecz wskutek niestateczności miejscowej (w stanie sprężysto – plastycznym) nie osiągają nośności przegubu plastycznego,
- **klasa 4 –** przekroje, które wskutek niestateczności miejscowej (w stanie sprężystym) wykazują nośność mniejszą niż to wynika z początku uplastycznienia strefy ściskanej.

Jan Żmuda



Rys. 2.1. Nośność przekroju w przypadku czystego zginania: a) ścieżki równowagi, b) związek między momentem zginającym M i kątem obrotu przekroju ϕ

Jan Żmuda
KONST OWANIE
LOWYCH
ratownicowe,
y, ramownice

klasa	Ściskanie i zginanie ścianki przekrojów porzecznych					
	α lub ψ	przęsłowa	wspornikowa		ściskany kątownik	ściskana rura
			brzeg rozciągany	brzeg ściskany		
						
	α	$\lambda = b/t \leqslant \lambda_{gr}$	$\lambda = b/t \leqslant \lambda_{gr}$	$\lambda = b/t \leqslant \lambda_{gr}$	$\lambda = b/t \leqslant \lambda_{gr}$	$\lambda = b/t \leqslant \lambda_{gr}$
1	1	$\leqslant 33\ \varepsilon$	$\leqslant 9\ \varepsilon$	$\leqslant 9\ \varepsilon$	–	$\frac{d}{t} \leqslant 50\ \varepsilon^2$
	0,5	$\leqslant 72\ \varepsilon$	$\leqslant 25\ \varepsilon$	$\leqslant 18\ \varepsilon$		
	> 0,5	$\leqslant \frac{396\ \varepsilon}{13\alpha - 1}$	$\leqslant \frac{9\ \varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$\leqslant \frac{9\ \varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
	$\leqslant$ 0,5	$\leqslant \frac{36\ \varepsilon}{\alpha}$	–	–		
2	1	$\leqslant 38\ \varepsilon$	$\leqslant 10\ \varepsilon$	$\leqslant 10\ \varepsilon$	–	$\frac{d}{t} \leqslant 70\ \varepsilon^2$
	0,5	$\leqslant 83\ \varepsilon$	$\leqslant 28\ \varepsilon$	$\leqslant 20\ \varepsilon$		
	> 0,5	$\leqslant \frac{456\ \varepsilon}{13\alpha - 1}$	$\leqslant \frac{10\ \varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$\leqslant \frac{10\ \varepsilon}{\alpha}$		
	$\leqslant$ 0,5	$\leqslant \frac{41,5\ \varepsilon}{\alpha}$	–	–		
	ψ				–	–
3	-1	$\leqslant 42\ \varepsilon$	$\leqslant 14\ \varepsilon$		$\frac{h}{t} \leqslant 15\ \varepsilon$ $\frac{t+h}{2t} \leqslant 11,5\ \varepsilon$	$\frac{d}{t} \leqslant 90\ \varepsilon^2$
	-1	$\leqslant 124\ \varepsilon$	$\leqslant 102\ \varepsilon$	$\leqslant 19\ \varepsilon$	–	
	> -1	$\leqslant \frac{42\ \varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$	$\leqslant 21\ \varepsilon\sqrt{k_\sigma}$		–	
	$\geqslant$ -1	$\leqslant 62\ \varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			–	

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

2.5. Efekt szerokiego pasa

Dźwigary podsuwnicowe spawane z blach, projektowane jako przekroje dwuteowe lub skrzynkowe, mogą mieć znaczne szerokości pasów.

W obliczeniach nośności efektywnego przekroju poprzecznego norma Eurokod [N32] zaleca uwzględniać ograniczenia szerokości pasów belki.

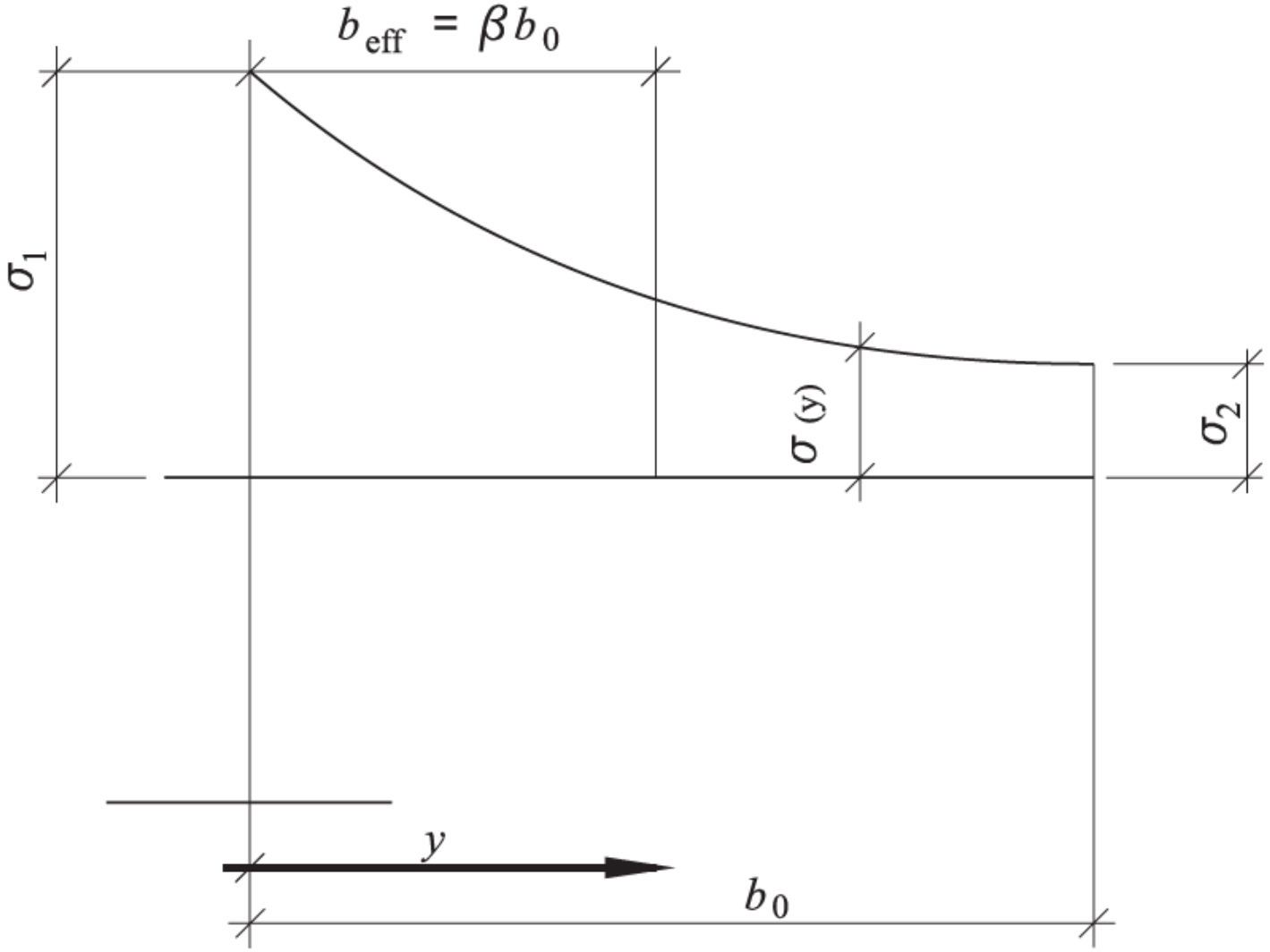
Szerokość efektywną pasa b_{eff} w stanie sprężystym wyznacza się ze wzoru:

$$b_{eff} = \beta\, b_0\,, \tag{2.10}$$

gdzie:

β - współczynnik szerokości efektywnej, który należy wyznaczać ze wzorów w tablicy 2.3, b_0 - szerokość rzeczywista.

Jan Żmuda



Rys. 2.3. Rozkład naprężeń w szerokim pasie

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

3.2.2. Nośność elementów rozciąganych

Przekroje poprzeczne brutto

Nośność elementu obciążonego siłą osiową rozciągającą działająca w linii środków ciężkości przekrojów poprzecznych A (rys. 3.2) należy określić z warunku:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \le 1, \tag{3.1}$$

gdzie:

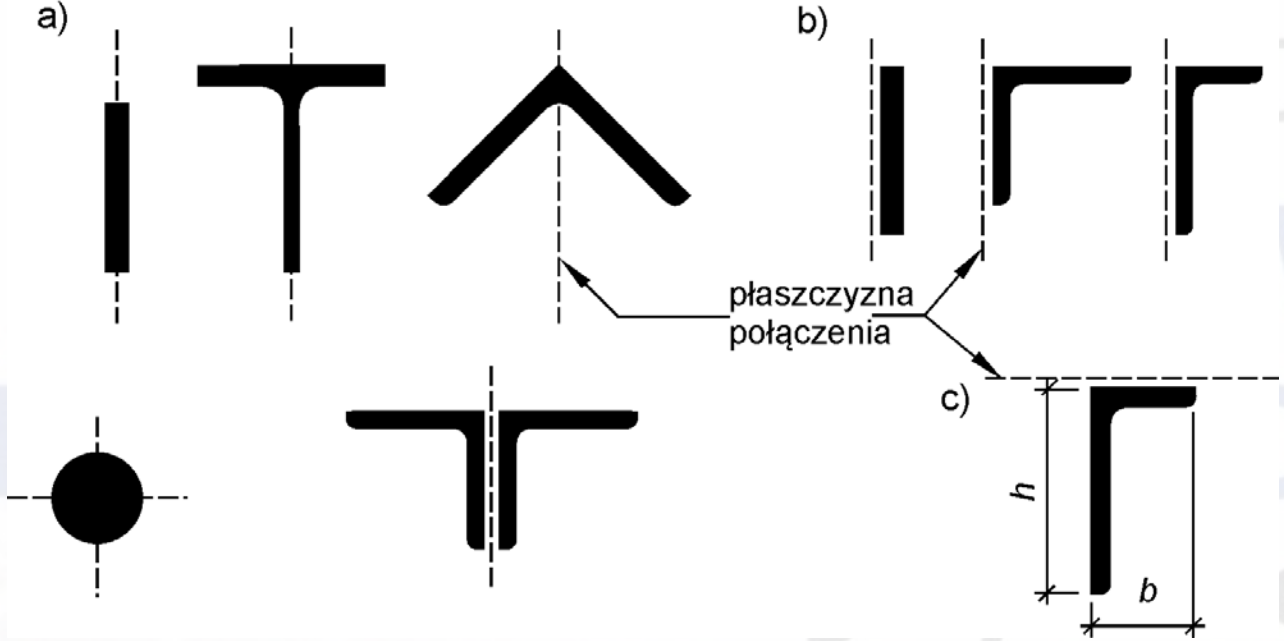
N_{Ed} - obliczeniowe obciążenie,

$N_{t,Rd}$ - obliczeniowa nośność plastyczna przekroju przy rozciąganiu,

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = A\frac{f_y}{\gamma_{Mo}} \tag{3.2}$$

gdzie: A - efektywny przekrój poprzeczny brutto,

$\gamma_{Mo} = 1.$



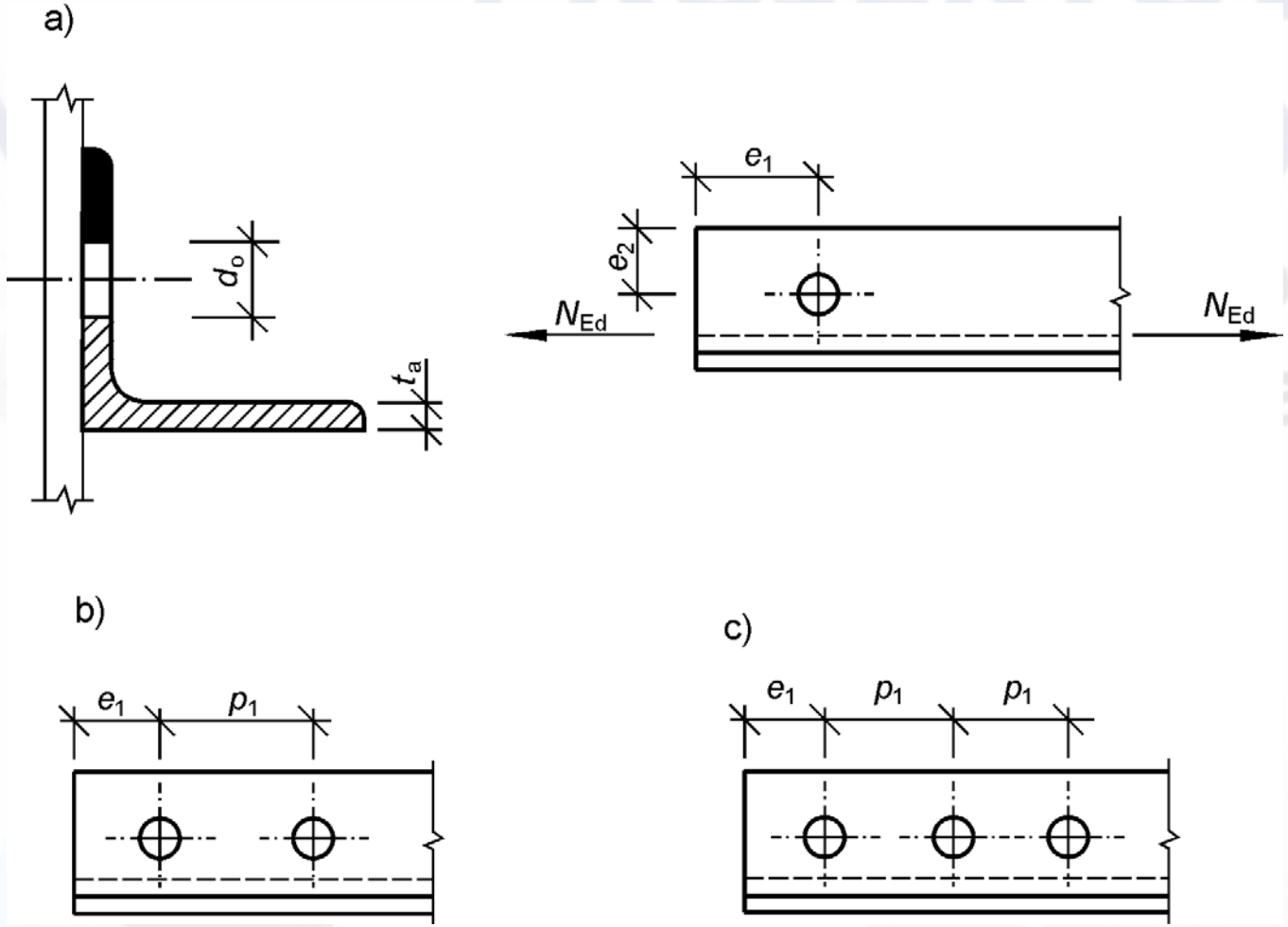
Rys. 3.3. Płaszczyzny połączeń wybranych przekrojów poprzecznych: a) przekroje poprzeczne z symetrycznymi płaszczyznami połączeń. b) i c) z niesymetrycznymi płaszczyznami połączeń

Zgodnie z normą PN-EN 1993-1-8 we wzorze 3.2 jako efektywne pole przekroju poprzecznego A należy przyjmować dla przekrojów jak na rys. 3.3a i b przekrój poprzeczny A_{br}, a dla kątownika nierównoramiennego (i podobnych innych przekrojów) przylegającego do płaszczyzny połączenia węższym ramieniem (rys. 3.3c) zredukowane pole:

$$A = A_{br}\,\frac{2\,b}{h+b}\,. \tag{3.3}$$

Pojedynczy kątownik niesymetryczny względem płaszczyzny połączenia z otworami na łączniki

Nośność obliczeniowa kątownika łączonego jednym ramieniem (rys. 3.4) można obliczać z warunków:



Rys. 3.4. Pojedynczy kątownik łączony jednym ramieniem

– z jednym otworem (rys. 3.4a)

$$N_{u,Rd} = \frac{2\,A^*\,f_u}{\gamma_{M2}}, \quad A^* = \left(e_2 - \frac{d_o}{2}\right) t_a, \tag{3.5}$$

– z dwoma otworami (rys. 3.4b)

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2\,A_{net}\,f_u}{\gamma_{M2}}, \tag{3.6}$$

– z trzema lub więcej otworami (rys. 3.4c)

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3\,A_{net}\,f_u}{\gamma_{M2}}, \tag{3.7}$$

gdzie:

β_2 i β_3 - współczynniki redukcyjne, których wartości zestawiono w tablicy 3.1,

A_{net} - pole przekroju netto kątownika, które przyjmuje się:

– dla kątownika równoramiennego lub nierównoramiennego łączonego szerszym ramieniem (rys. 3.3b)

$$A_{net} = A - d_o\,t_a, \tag{3.8}$$

– dla kątownika nierównoramiennego łączonego węższym ramieniem (rys. 3.3c) A_{net} oblicza się ze wzoru (3.8) przyjmując wartość A ze wzoru (3.3).

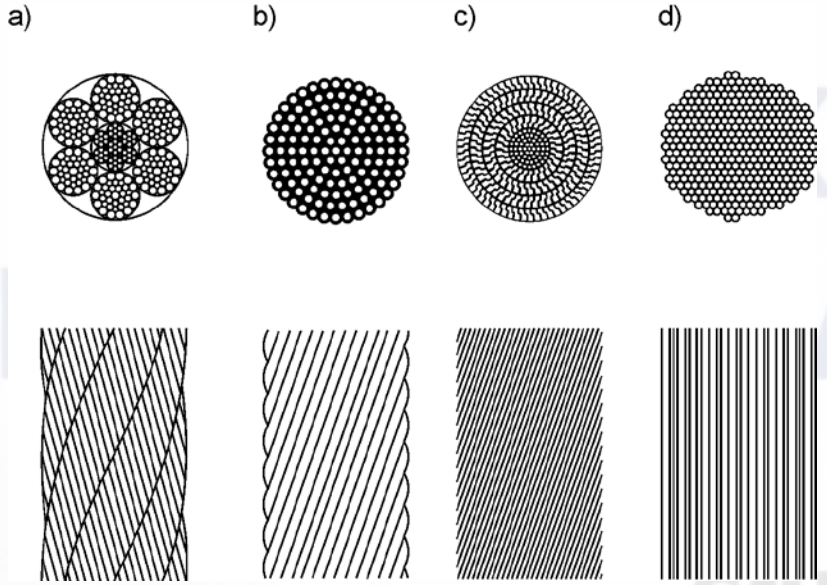
Tablica 3.1

Współczynniki redukcyjne β_2 i β_3

Rozstaw (rys. 3.4b, c)	$\leq 2{,}5\,d_o$	$\geq 5\,d_o$
2 otwory β_2	0,4	0,7
3 otwory β_3	0,5	0,7

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

3.3. Podatne elementy rozciągane (cięgna i liny)



Rys. 3.7. Przykłady lin [29]: a) wielozwita, b) spiralna otwarta, c) spiralna zamknięta, d) kabel złożony z drutów

Liny dwuzwite składają się z sześciu wiązek (pojedynczych lub jednozwitych) z wewnętrznym rdzeniem, który może być: stalowy, włókienny, z tworzyw sztucznych.

3.1.1. Nośność cięgien i lin

Nośność graniczną N_u liny lub cięgna można określić ze wzoru:

$$N_u = \frac{\pi d^2}{4} f_u \, n \, \eta ,$$

gdzie:

d - średnica pojedynczego drutu,

f_u - granica wytrzymałości pojedynczego drutu,

n - liczba pojedynczych drutów w przekroju liny,

η - współczynnik redukcyjny – zależy od rodzaju liny i wynosi $\eta = 0{,}75 \div 0{,}95$.

Właściwości wytrzymałościowe wybranych rodzajów lin podano w pracy [29].

Nośność obliczeniową $N_{t,Rd}$ rozciąganej liny można wyznaczyć ze wzoru:

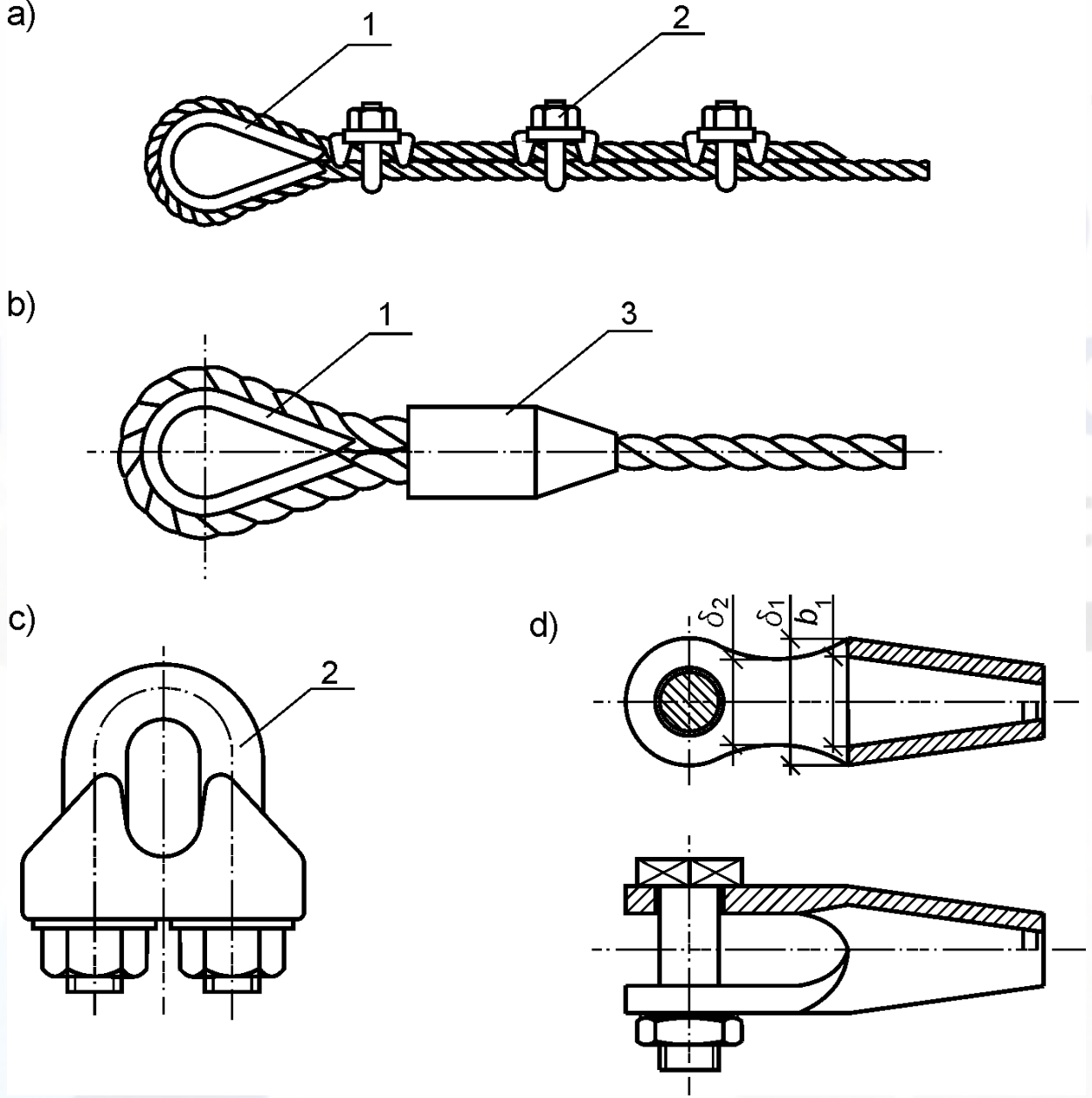
$$N_{t,Rd} = N_u \, \psi_i ,$$

gdzie ψ_i - współczynnik redukcyjny.

Współczynnik redukcyjny ψ_i jest przyjmowany dość arbitralnie przez projektanta w zależności od rodzaju liny, konsekwencji zniszczenia; przyjmowane są wartości w przedziale $\psi_i = 0{,}3 \div 0{,}5$.

Statykę pojedynczego cięgna szeroko omówiono w pracy [29].

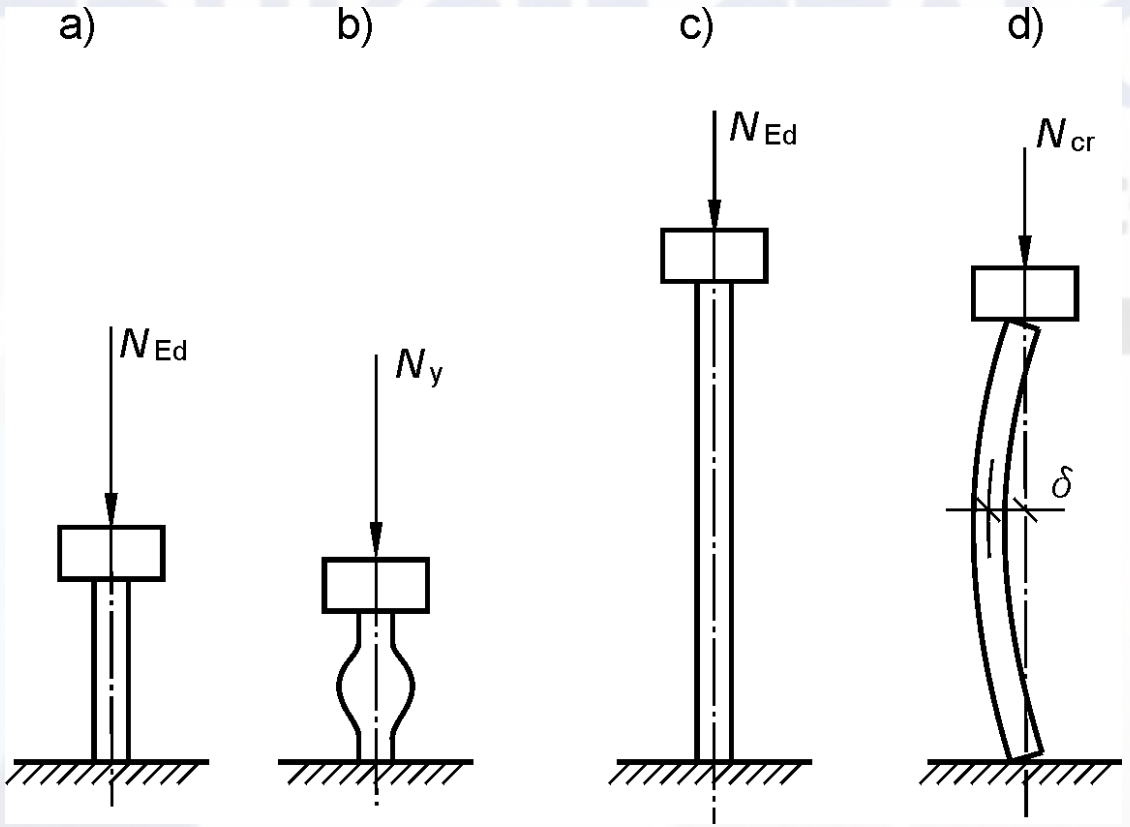
Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



Rys. 3.8. Zakotwienia cięgien (lin): a) pętla z zaciskami, b) pętla z klinującym stożkiem, c) zacisk, d) kotew stożkowa

4. ELEMENTY ŚCISKANE, WYBOCZENIE

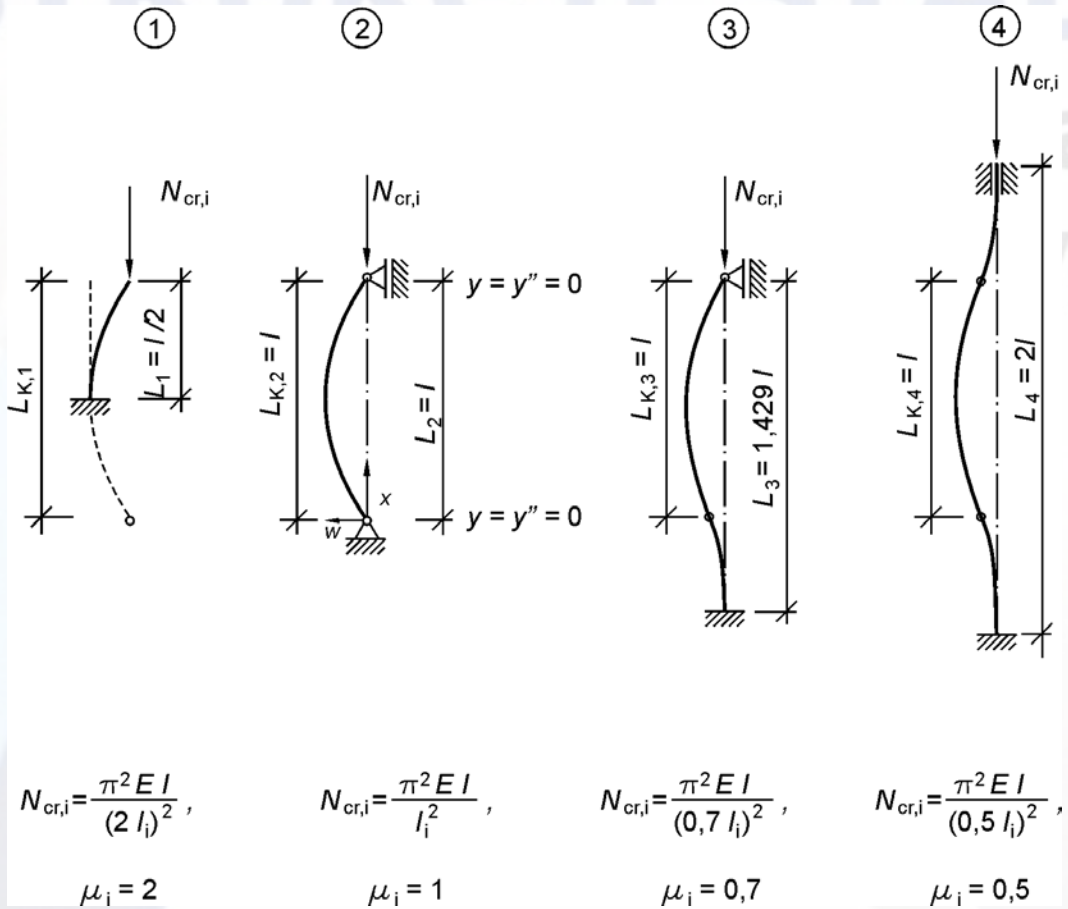
4.1. Istota wyboczenia elementu ściskanego



Rys. 4.1. Modele zniszczeń ściskanych elementów

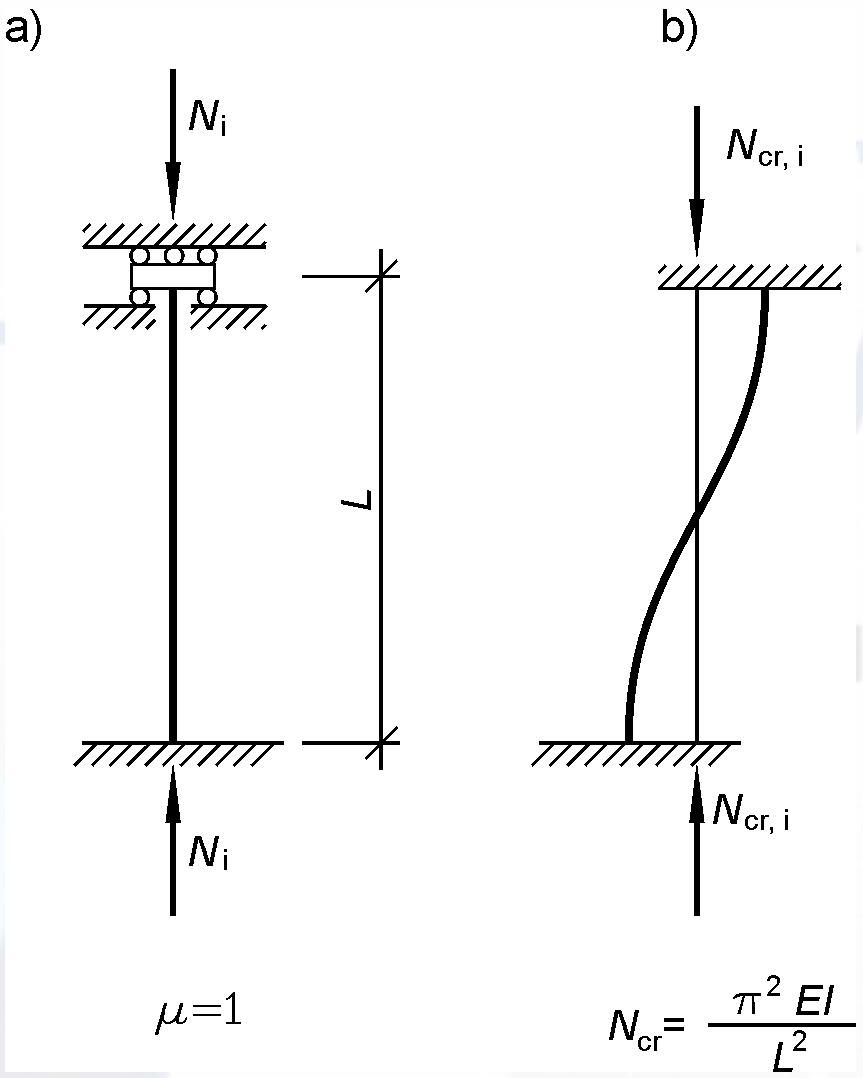
4.4. Długości wyboczeniowe wyizolowanych idealnych prętów

L. Euler analizował przypadki 4 ściskanych, wyboczonych prętów o jednakowych sztywnościach przekrojów poprzecznych, różnych warunkach podparcia i nie przesuwnych końcach, dla których określił teoretyczne linie wyboczeniowe $L_{k,i}$, odpowiadające im długości międzypodporowe l (rys. 4.3), a dalej współczynniki długości wyboczeniowych μ_i.



Rys. 4.3. Długości wyboczeniowe i siły krytyczne prętów o nieprzesuwnych końcach

Jan Żmuda
KONST
TOWANIE
ALOWYCH
kratownicowe,
py, ramownice



Rys. 4.4. Siła krytyczna pręta obustronnie sztywno umocowanego z górnym końcem poprzecznie przesuwnym

4.5. Nośność elementów osiowo ściskanych

4.5.1. Warunki nośności

W metodzie stanów granicznych, zgodnie z normą PN-EN 1993-1-1 nośność najbardziej wytężonych stałych na długości przekrojów poprzecznych elementów ściskanych należy sprawdzać ze wzorów:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \le 1, \qquad (4.2a)$$

gdzie:

N_{Ed} - obliczeniowa siła ściskająca,

$N_{b,Rd}$ - nośność na wyboczenie elementu ściskanego

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}, \qquad (4.2b)$$

gdzie:

$A = A_{br}$ - dla przekrojów klasy 1, 2, 3,

$A = A_{eff}$ - dla przekrojów klasy 4,

χ - współczynnik wyboczenia.

W określaniu pól przekrojów A_{br}, A_{eff} nie uwzględnia się ewentualnych otworów (np. na śruby) w przekrojach przywęzłowych.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

4.5.2. Krzywe wyboczenia giętnego

Współczynnik wyboczenia χ jest funkcją smukłości względnej $\overline{\lambda}$ i parametru imperfekcji α elementu ściskanego, który można obliczać wg wzorów:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_i^{\,2}}}, \text{ lecz } \chi \le 1{,}0 \qquad (4.3a)$$

gdzie

$$\phi = 0{,}5\left[1 + \alpha\left(\overline{\lambda}_i - 0{,}2\right) + \overline{\lambda}^2\right], \qquad (4.3b)$$

$$\overline{\lambda} = \sqrt{\frac{A\, f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i\, \lambda_1} \text{ dla przekrojów klasy 1, 2, 3,} \qquad (4.4a)$$

$$\overline{\lambda}_i = \sqrt{\frac{A_{eff}\, f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i\, \lambda_1}\sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \text{ dla przekrojów klasy 4,} \qquad (4.4b)$$

gdzie:

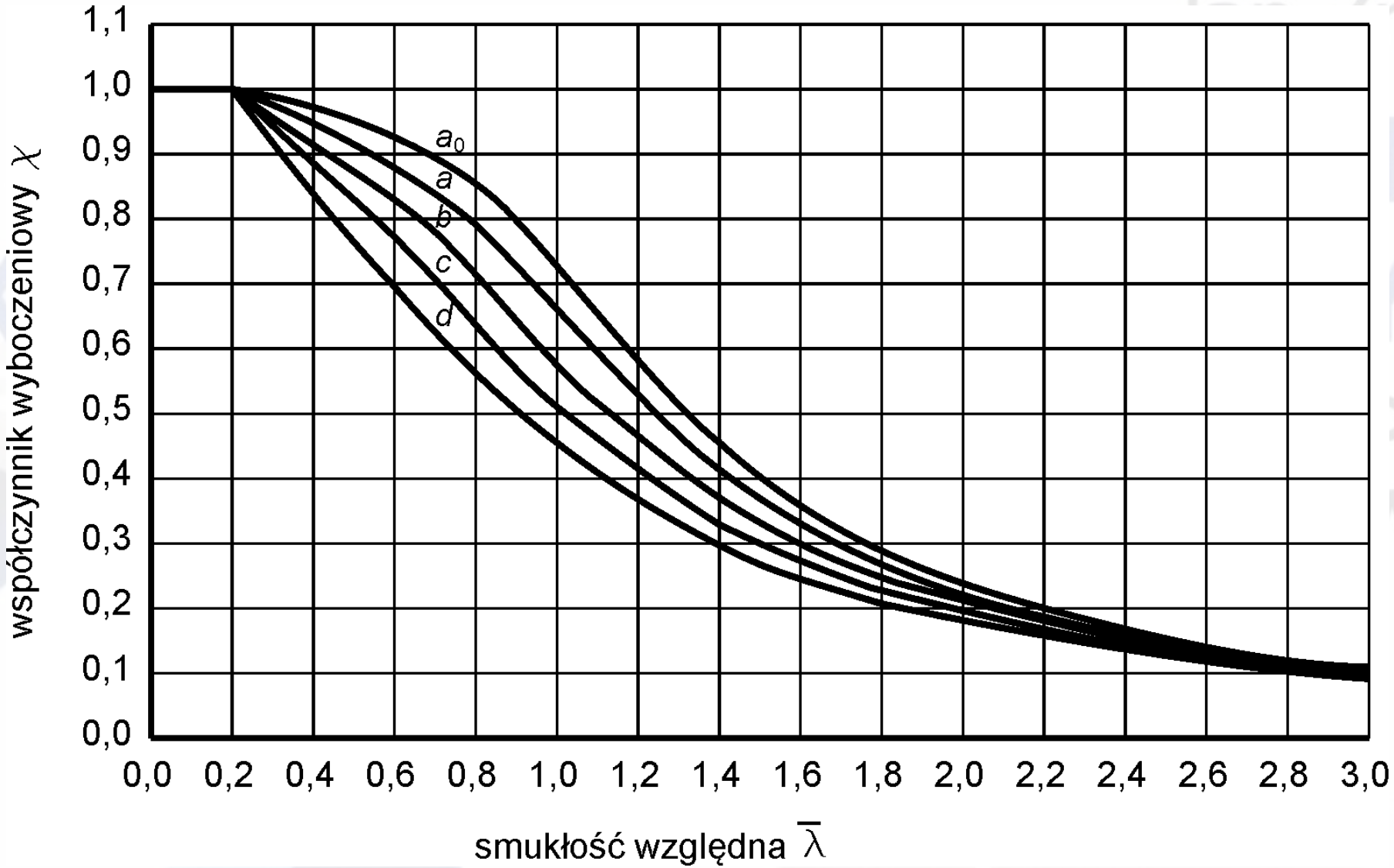
N_{cr} - siła krytyczna, wyznaczona na podstawie cech przekroju brutto (4.1),

$L_{cr} = \mu\, L$ - długość wyboczeniowa w obliczanej płaszczyźnie wyboczenia (y, z),

i - promień bezwładności przekroju względem odpowiedniej osi (y, z),

λ_1 - smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93{,}9\,\varepsilon, \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}, \quad f_y \text{ w N/mm}^2. \qquad (4.5)$$

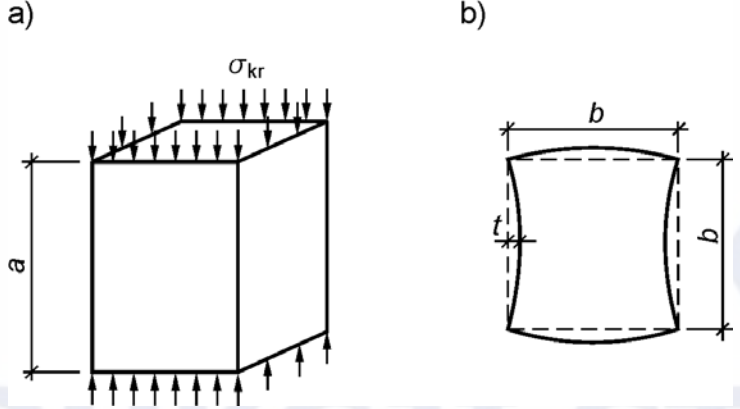


Rys. 4.5. Krzywe wyboczenia

4.6. Przekroje efektywne ścianek kl. 4 ściskanych elementów

4.6.1. Zjawisko utraty stateczności miejscowej

Cienkie środniki, pasy dwuteowników, ramiona kątowników, rur zamkniętych, jak też inne ścianki elementów ściskanych mogą ulec wyboczeniu (rys. 4.6b), jeśli ich obciążenia osiągną określone wartości nazywane krytycznymi. Zjawisko to nazywa się miejscową utratą stateczności. Modelem ścianki kształtownika może być swobodnie podparta na wszystkich krawędziach płyta prostokątna (rys. 4.7a) ściskana na krawędziach o szerokości b .



Rys. 4.6. Utrata stateczności miejscowej ścianek rury kwadratowej

Gdy naprężenia ściskające zbliżają się do wartości krytycznej określonej wzorem (4.6) następuje wyboczenie w postaci jednej fali podłużnej i 1 do 3 półfal poprzecznych będących falą i półfalami sinusoidy (rys. 4.7a, c). Naprężenie krytyczne generujące ugięcia płyty przy dowolnych warunkach jej podparcia na krawędziach, wyznaczyć można ze wzoru [33]:

$$\sigma_{kr} = \frac{k\,\pi^2\,E}{12\left(1-\nu^2\,\frac{b}{t}\right)^2}, \tag{4.6}$$

gdzie:

k - stała, której wartość zależy od sposobu podparcia brzegów oraz stosunku wysokości do szerokości (a/b) panelu ściskanego i sposobu obciążenia,

ν - liczba Poissona,

b - szerokość krawędzi obciążonego panelu (płyty),

t - grubość płyty.

4.6.2. Pola efektywne

Pola efektywne określa się dla:

– ścianek przęsłowych, którymi są środniki np. dwuteowników, ceowników, rur kwadratowych i prostokątnych, wg tablicy 4.1 normy PN-EN 1993-1-5,

– ścianek wspornikowych – pasy dwuteowników, ceowników, ramiona kątowników, wg tablicy 4.2 normy PN-EN 1993-1-5.

Pole przekroju współpracującego (efektywne) strefy ściskanej jest określone wzorem:

$$A_{c,eff} = \rho\, A_c , \tag{4.8}$$

gdzie:

ρ - współczynnik redukcyjny,

A_c - pole ścianki brutto, $A_c = t\,\bar{b}$,

t - grubość ścianki,

$\bar{b}$ - uogólniona szerokość ścianki.

Uogólnione szerokości ścianek $\bar{b}$, oznaczone literą c , dla różnych przekrojów poprzecznych spawanych i walcowanych zestawiono w tablicy 5.2 normy PN-EN 1993-1-1.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Współczynnik redukcyjny można obliczać według warunków:

– ścianki przęsłowe

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0{,}22}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ dla } \bar{\lambda}_p > 0{,}673, \tag{4.9}$$

– ścianki wspornikowe

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0{,}188}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ dla } \bar{\lambda}_p > 0{,}748. \tag{4.10}$$

Względną smukłość płytową $\bar{\lambda}_p$ należy obliczyć ze wzoru:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\,\varepsilon\,\sqrt{k_\sigma}}, \tag{4.11}$$

gdzie k_σ - parametr niestateczności.

Wartość parametru niestateczności przyjęto z tablicy 4.1 i 4.2 normy PN-EN 1993-1-5;
wartość ta dla ścianek wynosi ($\psi = 1$):

– przęsłowych $k_\sigma = 4$,

– wspornikowych $k_\sigma = 0{,}43$.

Szerokości efektywne b_{eff} przyjmuje się:

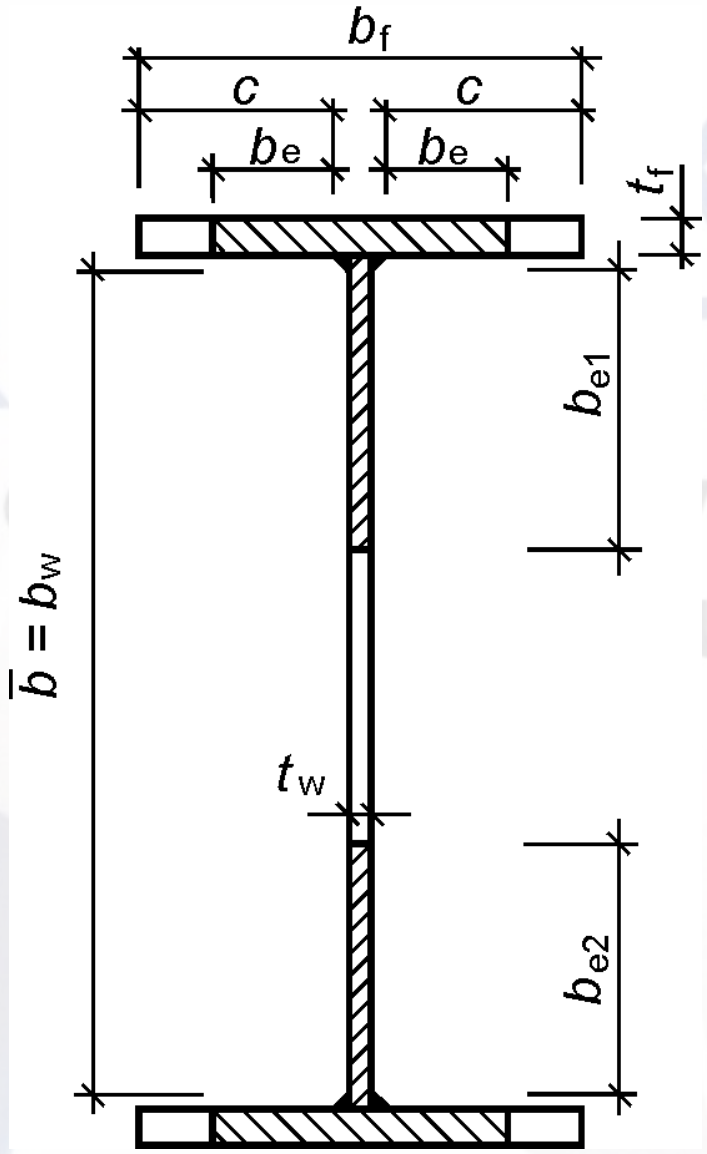
– dla ścianek przęsłowych

$$b = \rho\,\bar{b}\,,\ b_{e1} = b_{e2} = 0{,}5\,b_{eff}\,,$$

– dla ścianek wspornikowych

$$b_{eff} = \rho\,c\,.$$

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



Rys. 4.8. Efektywne pole przekroju pręta ściskanego klasy 4

Zgodnie z normą PN-EN 1993-1-1, Zał. BB1 długości wyboczeniowe $L_{cr,i}$ ściskanych prętów kratownicy należy przyjmować następująco:

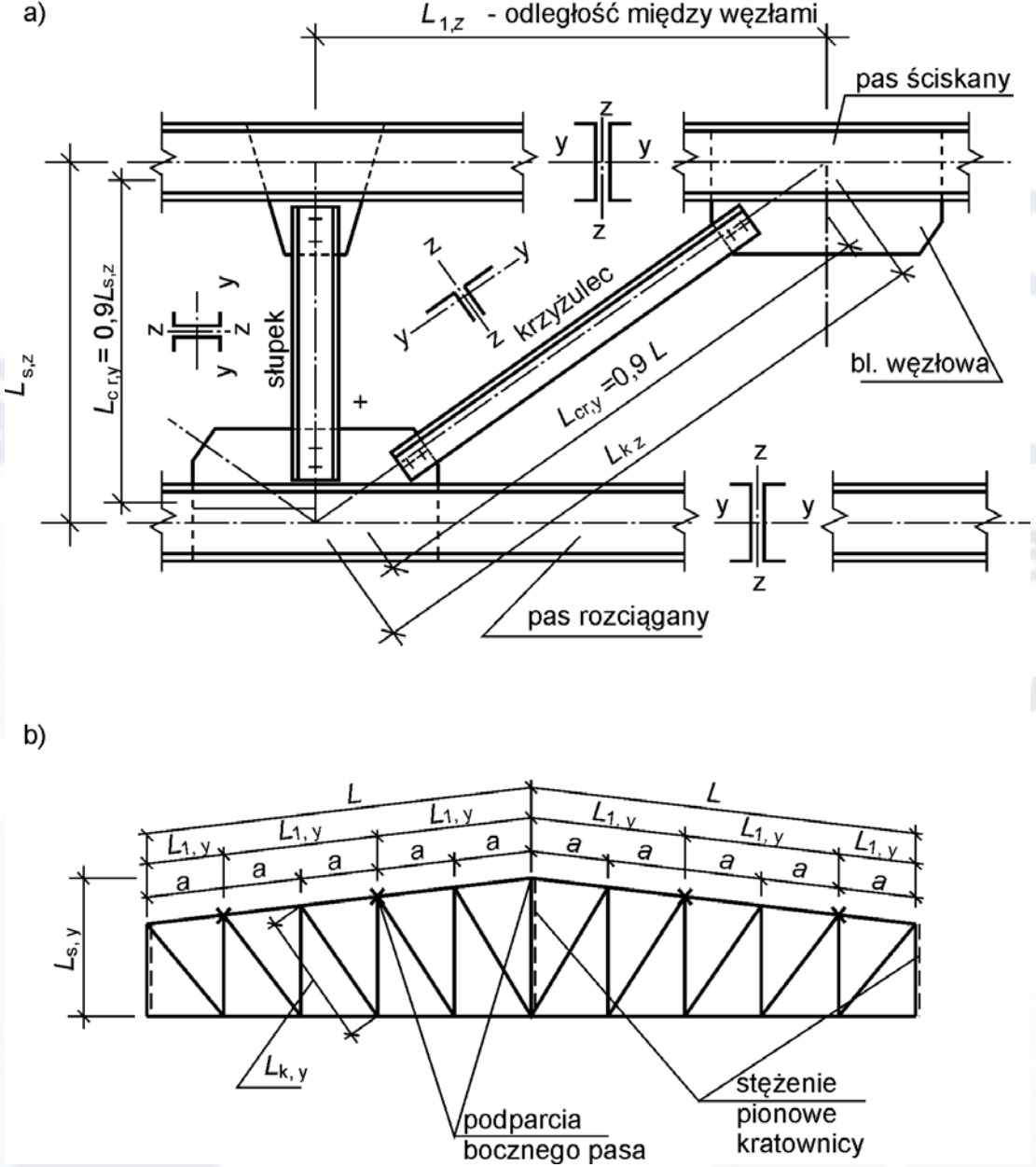
– <u>w płaszczyźnie kratownicy</u> (w płaszczyźnie z-z przekroju poprzecznego)
  - pasów ściskanych o przekroju dwuteowym (I, H), rurowym $L_{cr,y} = 0{,}9\, L_{1,z}$,
  - pasów ściskanych o innych przekrojach poprzecznych (kątowników, ceowników) $L_{cr,y} = L_{1,z}$ (rys. 4.11a),
  - skratowań (słupki i krzyżulce) (rys. 4.11a) $L_{cr,y} = 0{,}9\, L_{k,z}$,

– <u>z płaszczyzny kratownicy</u> – w kierunku prostopadłym, zgodnym z kierunkiem y przekroju poprzecznego
  - pasy ściskane o przekrojach nierurowych; długość wyboczeniowa $L_{cr,z}$ równa się

    odległości między stężeniami pionowymi lub podparciami bocznymi węzłów pasa (rys. 4.11b), tylko ze stężeniami pionowymi $L_{cr,z} = L = 5\, a$,

    z podparciami bocznymi $L_{cr,z} = L_{1,y} = 2\, a$,
  - pasy ściskane o przekrojach rury: $L_{cr,z} = 0{,}9\, L = 4{,}5\, a$ lub $L_{cr,z} = 0{,}9\, L_{1,y} = 1{,}8\, a$,
  - słupki i krzyżulce (skratowanie): $L_{cr,z} = L_{k,y} \quad \left(L_{k,z}\right)$.

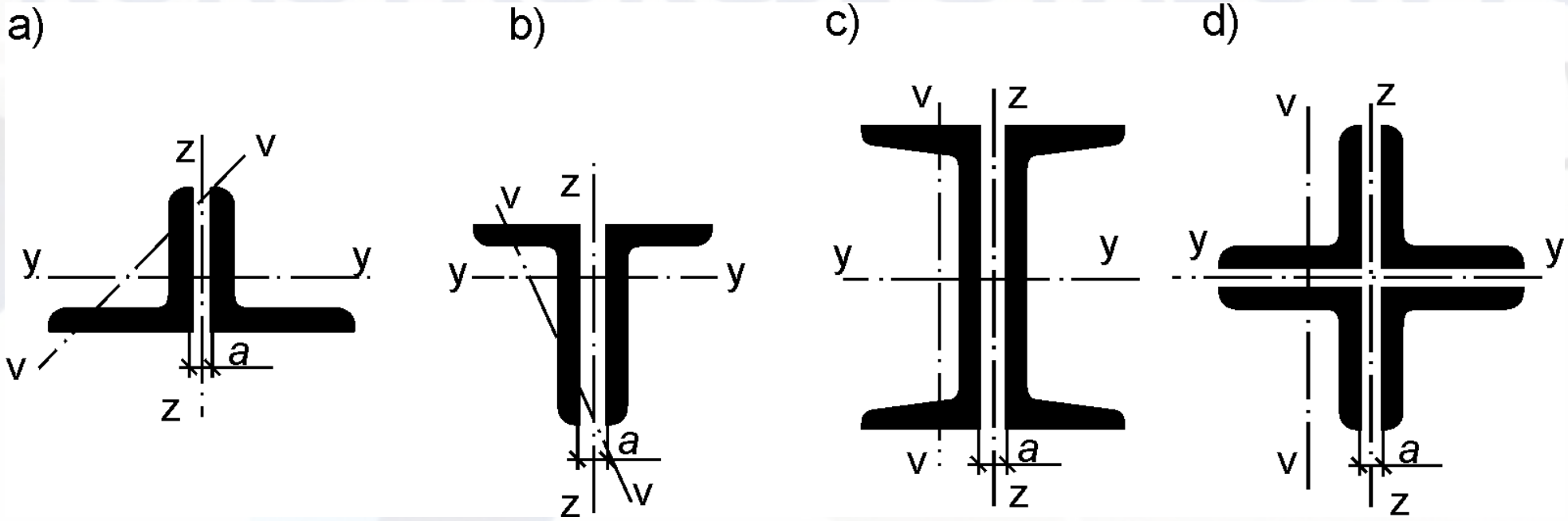
Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



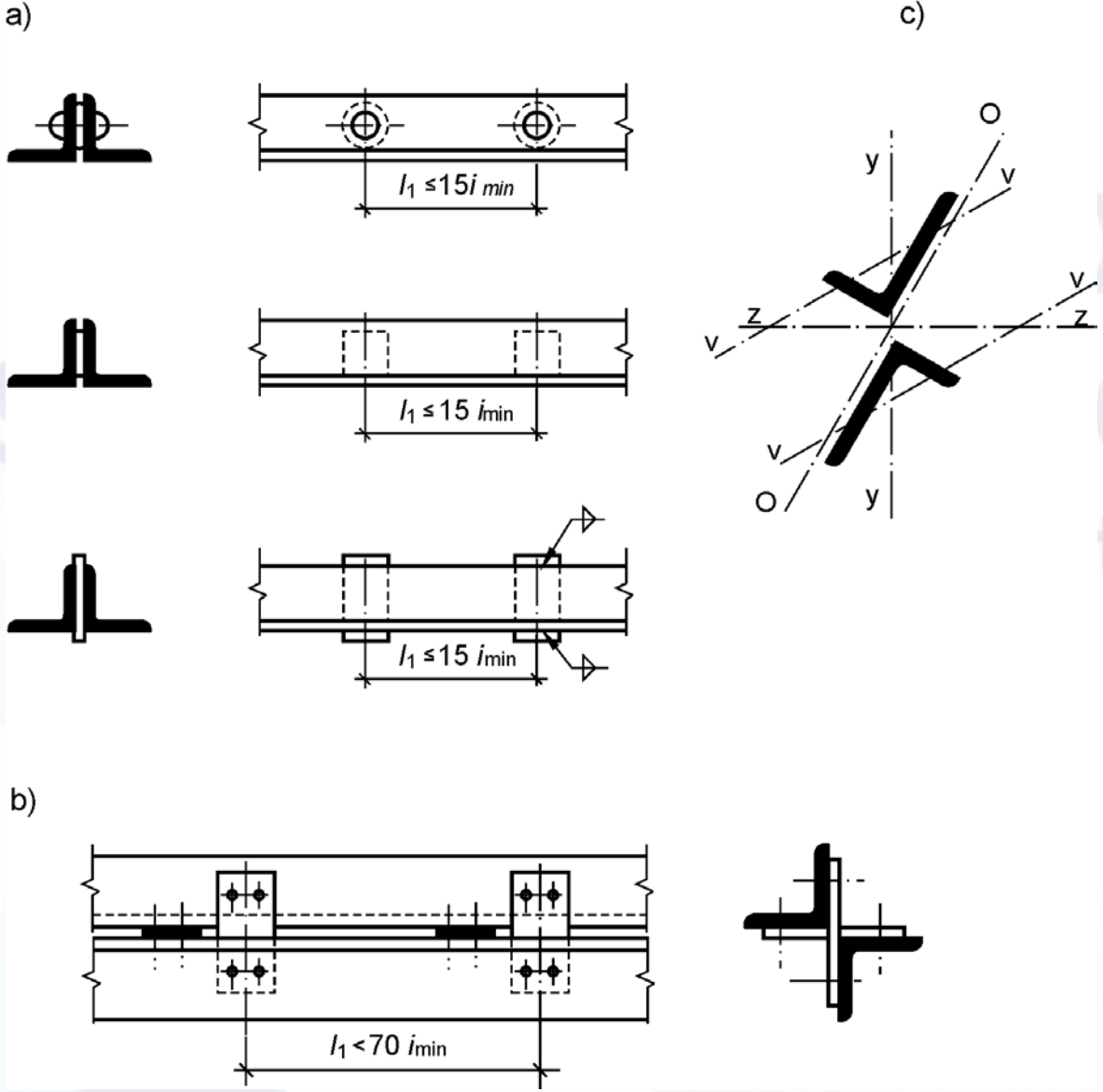
Rys. 4.11. Długości wyboczeniowe prętów kratownicy: a) długości wyboczeniowe w płaszczyźnie kratownicy, b) długości wyboczeniowe prostopadłe do płaszczyzny kratownicy

4.7.5. Pręty złożone bliskogałęziowe

Przekroje złożone prętów kratownic najczęściej są dwugałęziowe. Rozstaw gałęzi a (rys. 4.12) przyjmuje się z warunków minimalizujących smukłość pręta, a także z wymagań wytrzymałościowych i konstrukcyjnych, np. określających grubości blach węzłowych.



Rys. 4.12. Przekroje złożone bliskogałęziowe prętów kratownic



Rys. 4.13. Rozkład przekładek prętów złożonych: a) przekładki dystansowe, b) pary przekładek pręta z kątowników równoramiennych ustawione krzyżowo, c) kątowniki nierównoramienne ustawione krzyżowo

Promień bezwładności $i_{\min} = i_v$ (rys. 4.12) jest promieniem bezwładności minimalnym względem osi bezwładności v-v pojedynczej gałęzi pręta złożonego.

Dla przekroju złożonego z kątowników nierównoramiennych (rys. 4.13c) do obliczania smukłości λ_y można przyjąć wartość promienia bezwładności:

$$i_y = \frac{i_0}{1{,}15}, \tag{4.16}$$

gdzie i_0 jest promieniem bezwładności względem osi 0-0 przechodzącej przez środek ciężkości przekroju złożonego, równoległej do szerszych ramion kątowników.

W obliczaniu nośności prętów ściskanych z przekrojami złożonymi można pomijać mimośrody konstrukcyjne (odległości między linią działania obciążenia a środkiem ciężkości grupy łączników – śrub, spoin – patrz rozdz. 5) przyjmując smukłości względne efektywne $\overline{\lambda}_{eff,i}$ według wzorów:

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

$$\overline{\lambda}_{eff,y} = 0{,}5 + 0{,}7\,\overline{\lambda}_y\,,$$

$$\overline{\lambda}_{eff,z} = 0{,}5 + 0{,}7\,\overline{\lambda}_z\,, \qquad (4.17)$$

$$\overline{\lambda}_{eff,v} = 0{,}35 + 0{,}7\,\overline{\lambda}_v\,,$$

przy czym $\overline{\lambda}_y$, $\overline{\lambda}_z$, $\overline{\lambda}_v$ należy obliczać według wzorów (4.4) z uwzględnieniem (4.16), a także smukłości pojedynczej gałęzi pręta:

$$\lambda_v = \frac{l_1}{i_v}\,. \qquad (4.18)$$

Jeżeli rozstaw gałęzi a (rys. 4.12) jest dość duży np. powyżej 20 mm, to takie pręty złożone należy obliczać jako przewiązkowe lub skratowane (rys. 4.14), a więc z uwzględnieniem sztywności postaciowej S_v i teorii II rzędu.

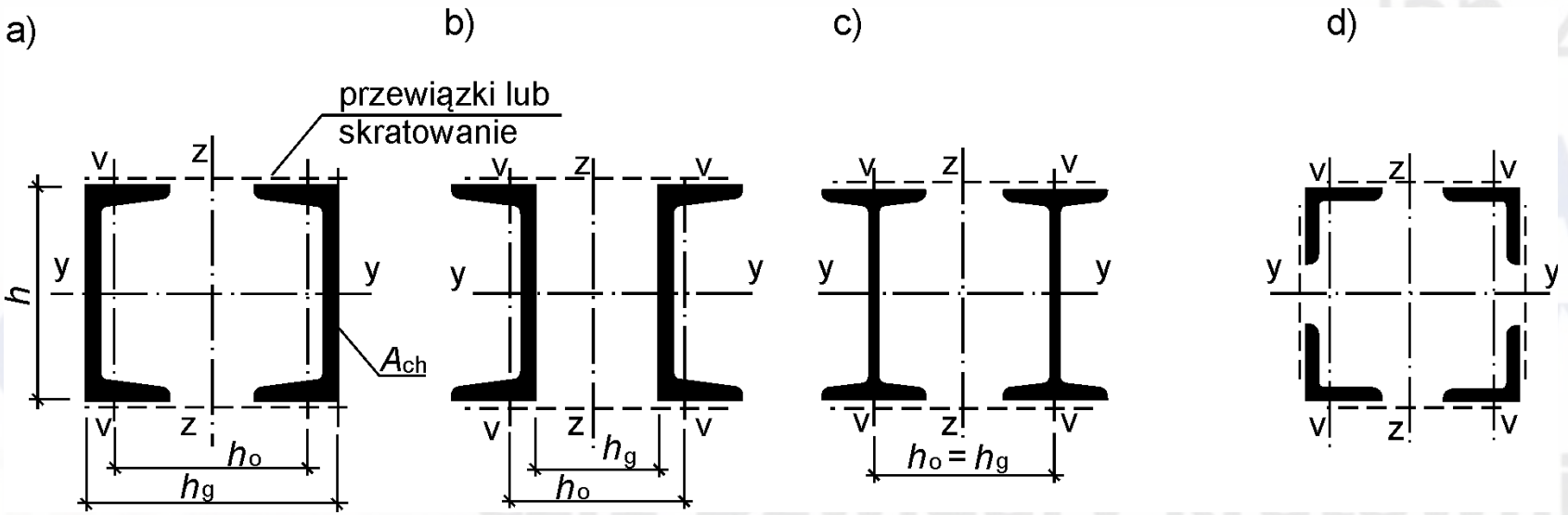
Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

4.8. Elementy ściskane złożone z przewiązkami lub skratowane

4.8.1. Kształtowanie cech geometrycznych

Ściskane elementy o przekrojach złożonych łączonych przewiązkami lub skratowaniem są stosowane w budownictwie na:

- pręty kratownic o dużych rozpiętościach (powyżej 20 m) i dużych obciążeniach (podciągi stropów, konstrukcje wsporcze suwnic, dźwigary mostowe),
- słupy ściskane osiowo oraz zginane i ściskane.



Rys. 4.14. Przekroje poprzeczne prętów złożonych

Kształt i pola przekrojów pojedynczych gałęzi (nazywanych także pasami elementu ściskanego) można przyjąć z tablic [8] na podstawie wzoru (4.12).

Rozstaw gałęzi (h_0) winien uwzględniać warunki:

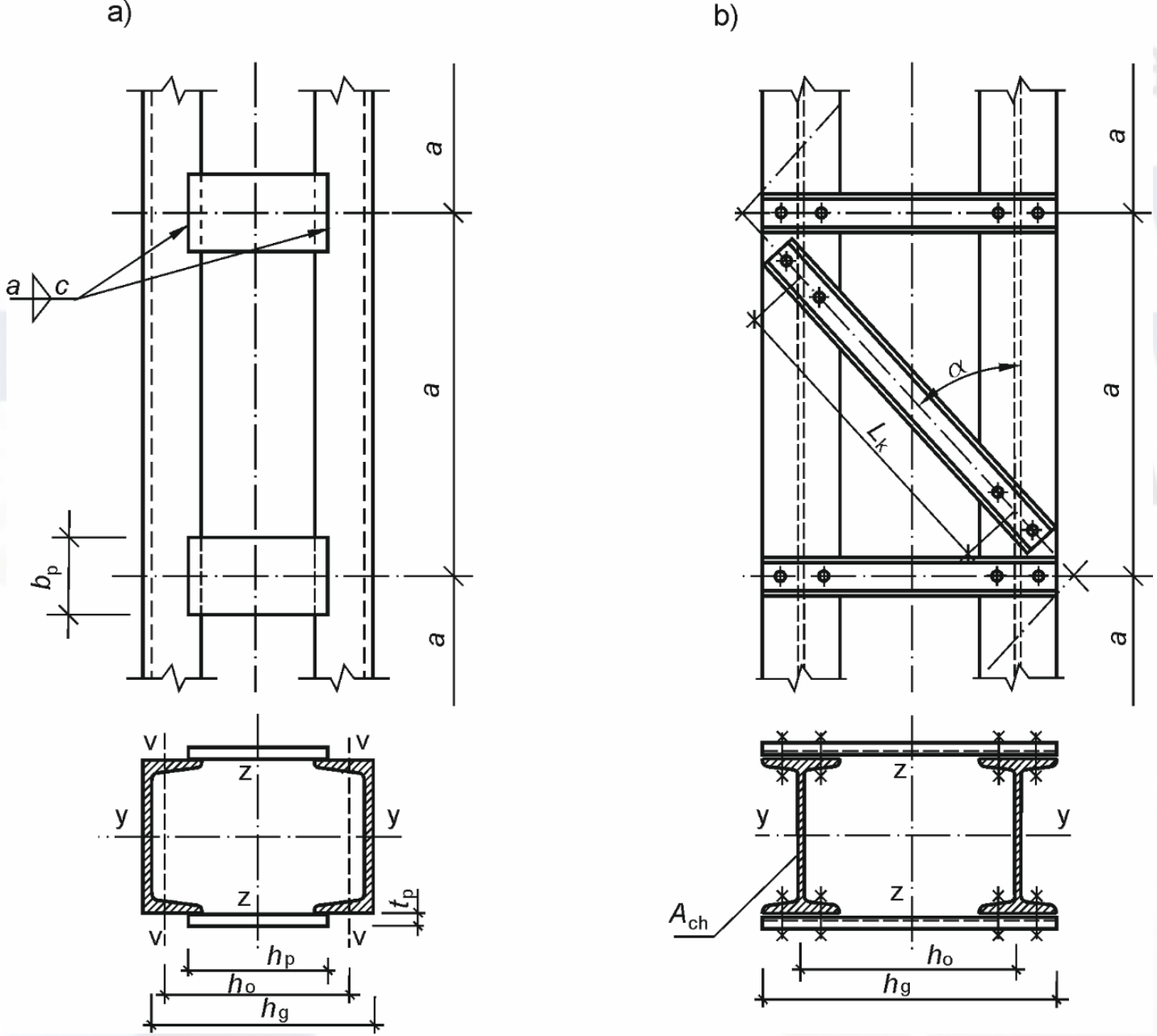
– konstrukcyjne, czyli możliwość połączeń i współpracy projektowanego pręta z innymi elementami ustroju budowlanego,
– sztywności; przyjmując dla przekroju „próbnego” smukłość $\lambda_y \geq \lambda_z$.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

4.8.2. Elementy ściskane z przewiązkami

Rozstaw przewiązek (a) (rys. 4.15a) lub węzłów skratowań (rys. 4.15b) można przyjąć wg warunku (4.15), czyli zgodnie z oznaczeniami jak na rys. 4.15:

$$a < 70\, i_{\min} = 70\, i_v \,. \qquad (4.19)$$



Rys. 4.15. Przewiązki i skratowania

4.8.3. Elementy ściskane ze skratowaniem

4.8.4. Siły wewnętrzne w pasach złożonego elementu ściskanego z uwzględnieniem imperfekcji i teorii II rzędu

W normie PN-EN 1993-1-1 nakazuje się przyjmowanie wstępnych imperfekcji geometrycznych w płaszczyźnie przewiązek lub skratowań (w kierunku osi y-y) o wartościach

$$e_o = \frac{\mu L}{500}, \tag{4.22}$$

gdzie:

μ - współczynnik zamocowania końców pręta,

L - długość pręta między węzłami.

Wstępne wygięcie e_o i wyboczenie pręta generuje siłę podłużną $N_{ch,Ed}$, momenty zginające 2 rzędu M_{Ed}, siły poprzeczne V_{Ed} (rys. 4.16).

Wartości tych momentów zginających i sił należy obliczać wg wzorów:

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

$$M_{Ed}^{II} = \frac{N_{Ed}\ e_o}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}}, \qquad (4.23)$$

$$N_{ch,Ed} = 0{,}5\ N_{Ed} + \frac{M_{Ed}\ h_0\ A_{ch}}{2\ I_{eff}}, \qquad (4.24)$$

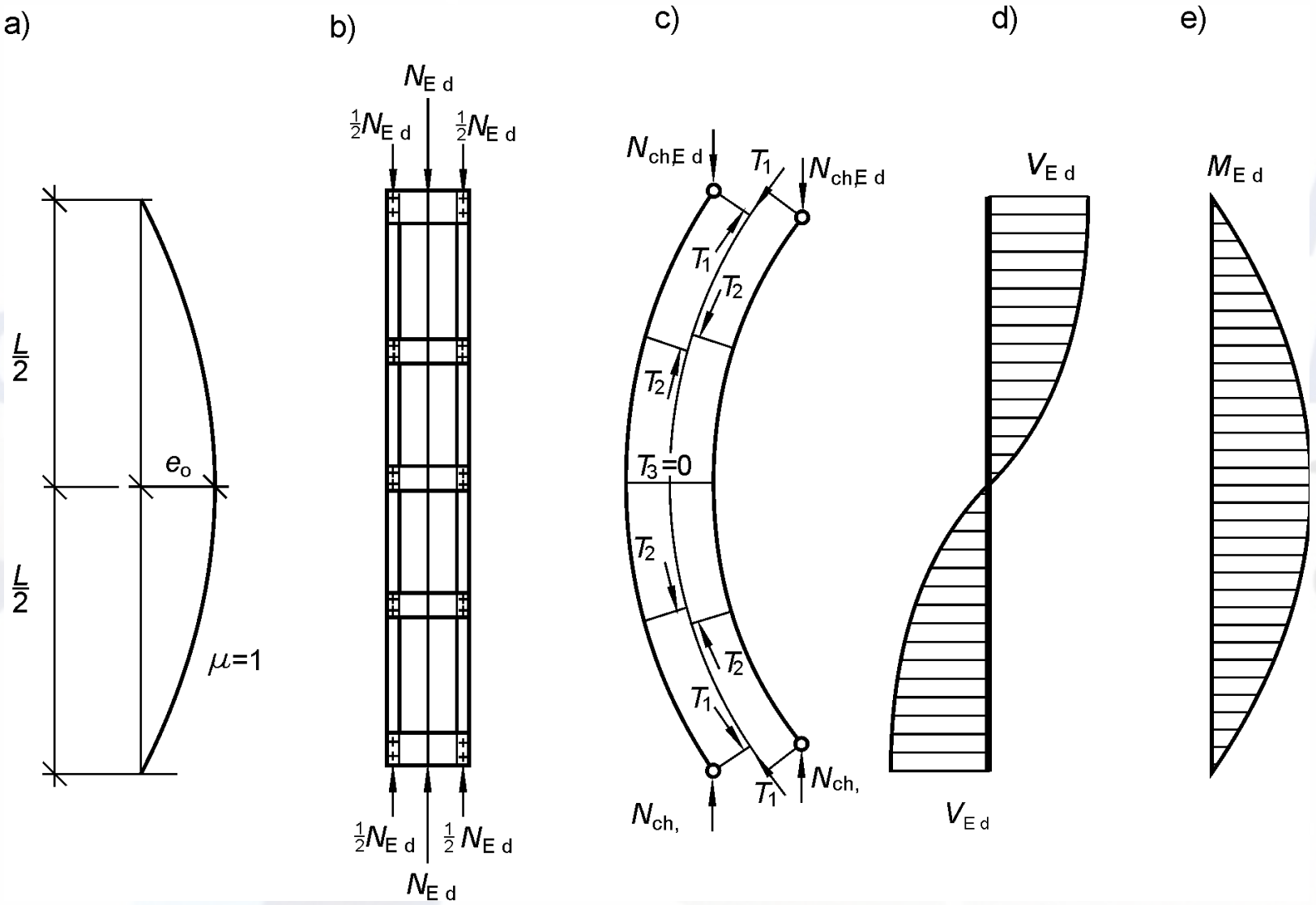
siła poprzeczna

$$V_{Ed} = M_{Ed}\ \frac{\pi}{\mu\ L}, \qquad (4.25)$$

gdzie:

$N_{cr,z} = \frac{\pi^2\ E\ I_{eff}}{(\mu\ L)^2}$ - zastępcza siła krytyczna elementu złożonego odpowiadająca

wyboczeniu w płaszczyźnie przewiązek,



Rys. 4.16. Schemat teoretyczny do obliczania nośności pręta złożonego przewiązkowego, dwugałęziowego: a) ugięcie początkowe, b) zarys konstrukcyjny pręta, c) model pręta wyboczonego, d) wykres sił poprzecznych, e) wykres momentów zginających II rzędu

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

Elementy złożone z przewiązkami

$$S_v = \frac{24\,E\,I_{ch,v}}{a^2\left[1+\frac{2\,I_{ch,v}\,h_0}{n\,I_b\,a}\right]} \le \frac{2\,\pi^2\,E\,I_{ch,v}}{a^2}, \qquad (4.26)$$

gdzie:

$I_{ch,v}$ - moment bezwładności gałęzi względem własnej osi v (rys. 4.14) i (rys. 4.15),

I_b - moment bezwładności przekroju poprzecznego przewiązki (rys. 4.15a) $I_b = \frac{t_p\,b_p^3}{12}$,

a - osiowy rozstaw przewiązek (rys. 4.15),

n - liczba płaszczyzn przewiązań.

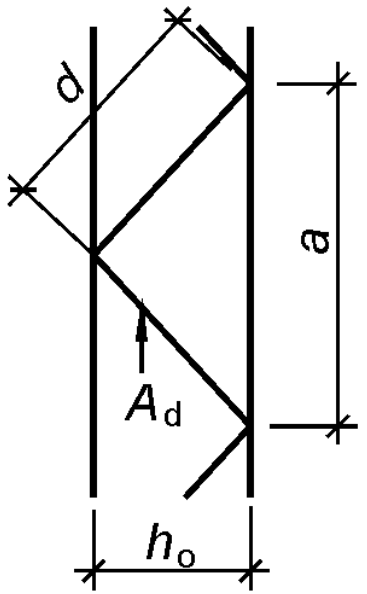
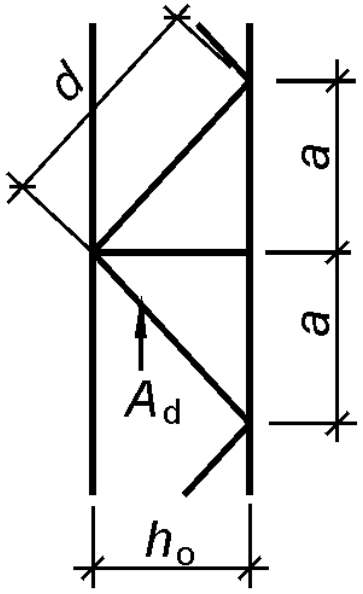
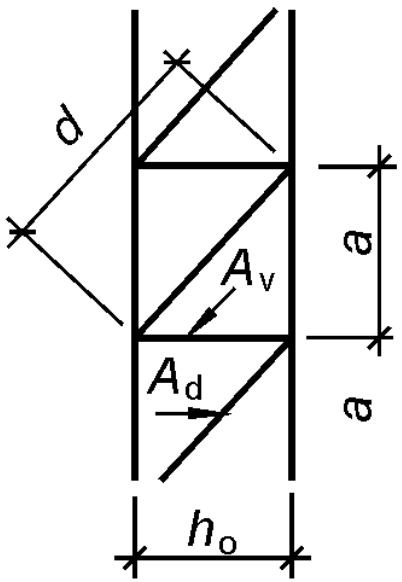
Zastępczy moment bezwładności elementu złożonego z przewiązkami można obliczać według wzoru

$$I_{\text{eff}} = 0,5h_0^2 A_{\text{ch}} + 2\mu I_{\text{ch},v}, \tag{4.27}$$

gdzie: $I_{\text{ch},v}$ – moment bezwładności gałęzi względem osi v-v, μ – wskaźnik efektywności według tablicy 4.4.

Tablica 4.4. Wskaźniki efektywności μ (PN-EN 1993-1-1. tabl. 6.8)

Przedział smukłości	Wskaźnik μ
$\lambda \geqslant 150$	0
$75 < \lambda < 150$	$\mu = 2 - \frac{\lambda}{75}$
$\lambda \leqslant 75$	1,0
gdzie: $\lambda = \frac{L_{\text{cr},z}}{i_0}$, $i_0 = \sqrt{\frac{I_z}{2A_{\text{ch}}}}$, $I_z = 0,5h_0^2 A_{ch} + 2I_{\text{ch},v}$	

Układ			
S_v	$\frac{nEA_d ah_o^2}{2d^3}$	$\frac{nEA_d ah_o^2}{d^3}$	$\frac{nEA_d ah_o^2}{d^3\left[1+\frac{A_d h_o^3}{A_v d_o^3}\right]}$
n - liczba płaszczyzn skratowania A , A - pole przekroju krzyżulca, słupka			

Rys. 4.17. Sztywność postaciowa skratowania w elementach złożonych

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

Wyboczenie z płaszczyzny przewiązek lub skratowań czyli względem osi y-y

Nośność można obliczać jak dla pręta pełnościennego, czyli według wzorów 4.2 ÷ 4.3, przyjmując długości wyboczeniowe $L_{cr,y}$:

– dla prętów kratownic, zgodnie z zasadami podanymi w p. 4.7.3,
– dla prętów o innych funkcjach, zgodnie z modelami prętów pokazanymi na rys. 4.3 i 4.4,
– dla słupów – wg zasad stosowanych w ich projektowaniu (rozdział 7).

Wyboczenie pojedynczej gałęzi względem własnej osi v-v (rys. 4.18)

Nośność przekroju pojedynczej gałęzi pręta złożonego należy sprawdzać według wzorów:

$$\frac{N_{ch,Ed}}{\chi_y W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{f,Ed}}{W_{z,ch} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \le 1, \qquad (4.31a)$$

$$\frac{N_{ch,Ed}}{\chi_v A_{ch} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{f,Ed}}{W_{z,ch} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \le 1, \qquad (4.31b)$$

Nośność przewiązek

Na przekrój poprzeczny przewiązki oddziaływuje siła poprzeczna T (rys. 4.18) i moment zginający $M_{p,Ed}$, którego wartości można obliczyć ze wzorów:

$$T = \frac{V_{Ed}\ a}{2\ h_0},\quad M_{p,Ed} = \frac{V_{Ed}\ a}{4}. \tag{4.32}$$

Nośność przewiązki należy obliczyć z warunku:

– na zginanie

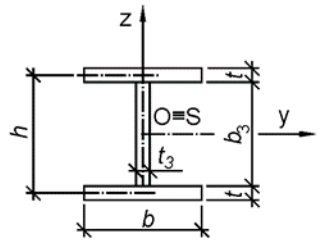
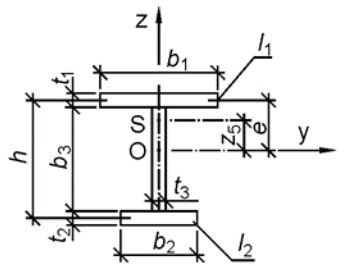
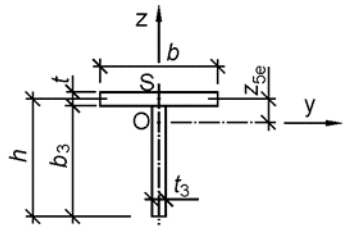
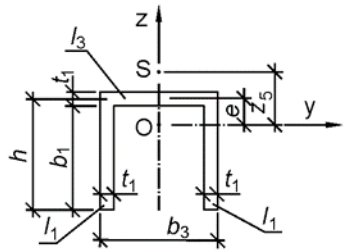
$$\frac{M_{p,Ed}}{W_{p,pl}\ f_y} \le 1, \tag{4.33}$$

– na ścinanie

$$\frac{T\ \sqrt{3}}{A_p\ \dfrac{f_y}{\gamma_{Mo}}} \le 1,$$

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

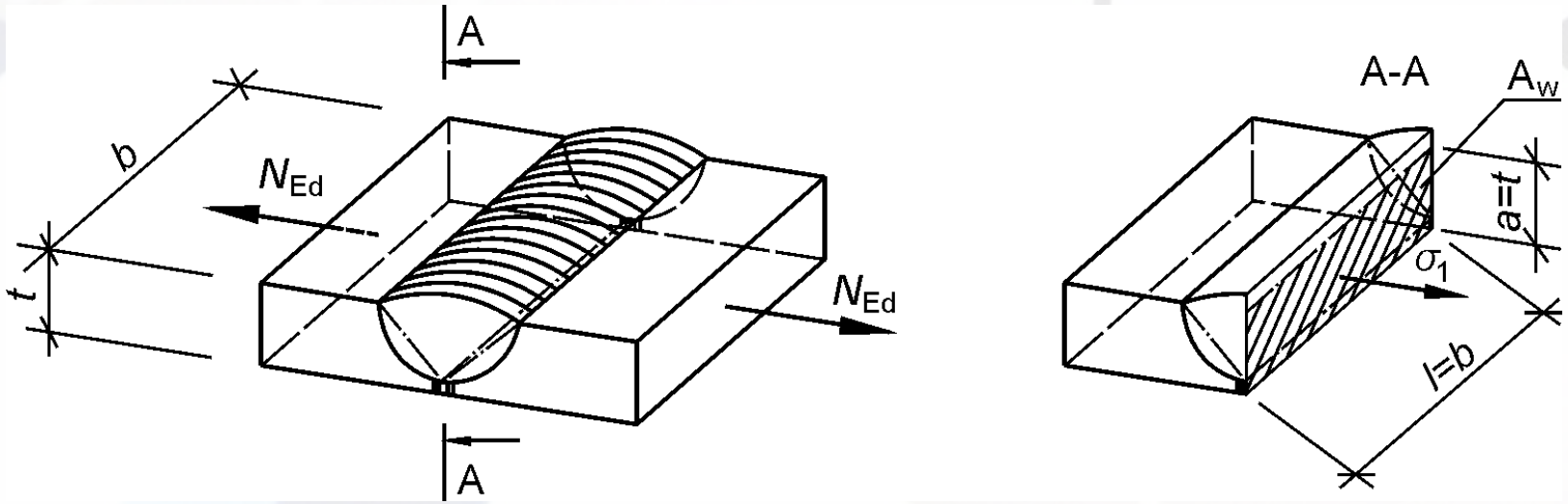
4.9. Pręty o przekrojach otwartych monosymetrycznych

Przekrój	Cechy geometryczne
	$Z_s = 0$ $I_\omega = \frac{I\ h^2}{4}$ $I_T = \frac{1}{2}(2bt^3 + b_3 t_3^3)$ $r_y = 0$ S - środek ścinania O - środek ciężkości
	$Z_s = \frac{1}{I_z}[eI_1 - (h - e)\,I_2] = e - \frac{I_2}{I_z}h$ $I_\omega = \frac{I_1\ I_2\ h^2}{I_1 + I_2}$ $I_T = \frac{1}{3}(b_1 t_1^3 + b_2 t_2^3 + b_3 t_3^3)$ $r_y = \frac{1}{I_z}\{Z_s I + b_1 t_1 e^3 - b_2 t_2 (h - e)^3 + \frac{t_3}{4}[e^4 - (h - e)^4]\}$
	$Z_s = e$ $I_\omega = 0$ $I_T = \frac{1}{3}(b\,t^3 + b_3 t_3^3)$ $r_y = \frac{1}{I}\{e\,I + b\,t\,e^3 + \frac{t_3}{4}[e^4 - (h - e)^4]\}$
	$Z_s = e + \frac{I_1 h}{I_z}$ $I_\omega = \frac{h^2}{3} \cdot \frac{I_1^2 + 2I_1 I_3}{I_z}$ $I_T = \frac{1}{3}(2b_1 t_1^3 + b_3 t_3^3)$

5.1. Złącza ze spoinami czołowymi

Spoiny czołowe wykonuje się z złączach doczołowych krzyżowych lub teowych (tabl. 1.3). Spoiny czołowe stosuje się najczęściej do łączenia pojedynczych blach i płaskowników, jak też do łączenia blach płaszczy zbiorników, silosów i bunkrów.

Przekroje poprzeczne spoin czołowych są najczęściej prostopadłe do kierunku sił rozciągających lub ściskających działających na złącza (np. rys. 5.1).



Rys. 5.1. Pole przekroju poprzecznego spoiny czołowej

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, ownice

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

Nośność elementów rozciąganych lub ściskanych połączonych spoinami czołowymi z pełnym przetopem można obliczyć wg wzoru:

$$\frac{N_{Ed}}{A_w \dfrac{f_{y,w}}{\gamma_{Mo}}} \le 1, \qquad (5.1)$$

gdzie:

A_w - pole przekroju spoiny, $A_w = a\,l$ (a - grubość spoiny, l - długość spoiny),

$f_{y,w}$ - granica plastyczności spoiny, której wartość powinna być większa lub co najmniej równa granicy plastyczności elementu łączonego.

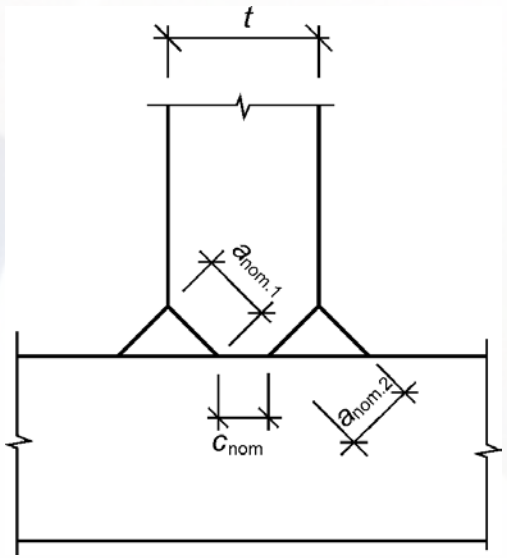
Długość spoiny l jest równa szerokości łączonego elementu b, jeśli spoina jest wyprowadzona na płytki wybiegowe (rys. 1.15).

Nośność obliczeniowa złącza teowego z niepełnym przetopem (tabl. 1.5 poz.7) można obliczać jak dla spoin z pełnym przetopem, wg wzoru (5.1) pod warunkiem, że całkowita nominalna grubość spoiny a jest większa lub równa od grubości cieńszego z elementów łączonych (rys. 5.2), czyli spełnione są warunki:

$$a = a_{1,nom} + a_{2,nom} \geq t\,, \qquad (5.2)$$

$$c_{nom} \geq \min\left\{\frac{t}{5}, 3\ \text{mm}\right\}.$$

Nośność złącza, z niepełnymi spoinami czołowymi nie spełniających warunku (5.2), określa się jak dla złączy ze spoinami pachwinowymi.



Rys. 5.2. Złącze teowe z niepełnym przetopem

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

5.2. Złącza zakładkowe ze spoinami pachwinowymi

5.2.1. Założenia do obliczeń, wytrzymałość spoiny na ścinanie

- Spoiny pachwinowe stosuje się w złączach zakładkowych, węzłach kratownicowych, a także w złączach teowych, krzyżowych, kątowych (tabl. 1.3), alternatywnie do spoin czołowych.
- Jako obliczeniową długość spoiny pachwinowej l_{eff} przyjmuje się długość, na której spoina ma pełny przekrój łącznie z początkiem i końcem spoiny (bez kraterów spawalniczych), czyli długość grani spoiny spełniająca warunki (1.1).
- Jako obliczeniową grubość spoiny pachwinowej a przyjmuje się wysokość największego trójkąta (z równymi lub nierównymi ramionami) jaki może być wpisany w obrys przekroju poprzecznego spoiny, mierzoną prostopadle od lica do grani (rys. 1.17), spełniającą warunki z tabl. 1.5 poz. 9, 10.
- Jako pole obliczeniowe spoiny pachwinowej przyjmuje się sumę iloczynów grubości a_i i długości l_i (rys. 1.19), czyli

$$A_w = \sum (a_i \; l_i).$$

- Jeśli środek ciężkości grupy spoin nie pokrywa się z linią działania siły obciążającej, to w obliczeniach należy uwzględnić wpływ generowanego momentu siły na nośność spoin.
- Wytrzymałość spoiny na ścinanie, zgodnie PN-EN 1993-1-8 obliczać należy wg wzoru:

$$f_{vw,d} = \frac{\frac{f_u}{\sqrt{3}}}{\beta_w \gamma_{M2}}; \quad \gamma_{M2} = 1{,}25, \tag{5.3}$$

gdzie:

f_u - granica wytrzymałości stali na rozciąganie słabszego z łączonych elementów,

β_w - współczynniki korelacji zależny od grupy gatunków stali (tablica 5.1).

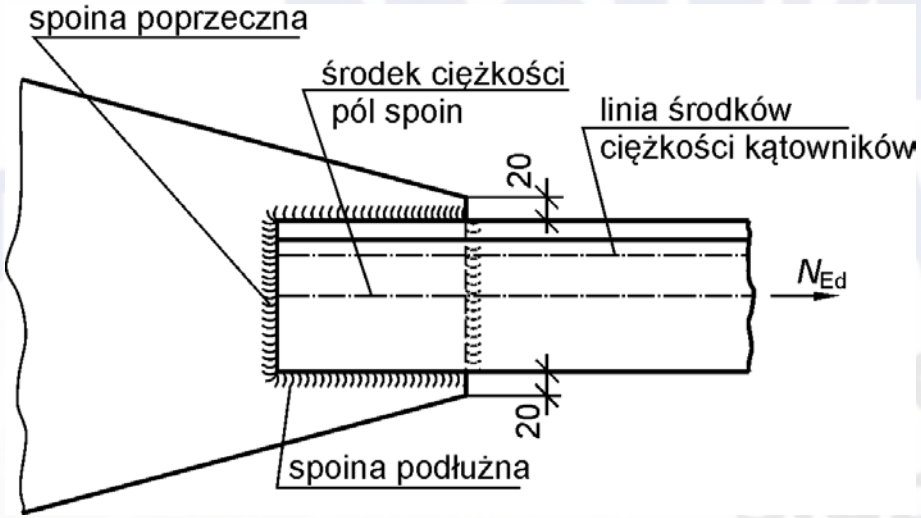
Tablica 5.1

Wartości współczynnika korelacji β_w i wytrzymałości spoin na ścinanie dla elementów o grubości $t \leq 40$ mm

Oznaczenie grup gatunków stali wg EN 10210-1	β_w	$f_{vw,d}$ **[N/mm^2]**
S235	0,8	207,8
S275 (NH/NLH)	0,85	233,7 (211,9)
S355 (NH/NLH)	0,90	261,7 (251,5)
S420 NH/NLH	1,0	249,4
S460 NH/NLH	1,0	258,7
W nawiasach podano wartości gatunków stali oznaczonych także w nawiasach		

Jan Żmuda PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Pole przekroju poprzecznego spoin pachwinowych A_w może być sumą pól przekrojów spoin podłużnych otworowych, a także przekrojów poprzecznych (rys. 5.6).



Rys. 5.6. Połączenie zakładkowe ze spoinami podłużnymi i poprzecznymi obciążonymi równomiernie

Jednak linia działania obciążenia przecina środek ciężkości grupy spoin aby naprężenia w nich były jednakowe.

Spoiny pachwinowe łączące elementy o przekrojach niesymetrycznych (rys. 5.7) będą obciążone nierównomiernie, jeśli ich pola przekrojów $A_{w,1} = a_1\ l_1$ i $A_{w,2} = a_2\ l_2$ będą jednakowe. Siła osiowa N_{Ed} przyłożona w linii środków ciężkości kątowników rozdziela się odwrotnie proporcjonalnie do odległości odcinków spoin l_i od linii środków ciężkości kątowników.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz. 1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, rygle, ownice

Pomijając wpływ grubości spoin, przy zachowaniu oznaczeń jak na rys. 5.7, z warunków równowagi statycznej otrzyma się:

$$N_{Ed,1} = \frac{e}{b} N_{Ed}\,; \quad N_{Ed,2} = \frac{b-e}{b} N_{Ed}\,, \tag{5.5}$$

Spoiny pachwinowe obciążone nierównomiernie

Wskutek nierównomiernego (mimośrodowego) obciążenia spoin wytężenie naprężeń ścinających w spoinach będzie niejednakowe (rys. 5.8a). Działające na grupę spoin zredukowane do środka ciężkości siły wewnętrzne: moment zginający M_{Ed} i siła rozciągająca N_{Ed} generować będą naprężenia ścinające τ_M i τ_N. Wartość naprężeń ścinających τ_M wzrasta wraz ze wzrostem odległości analizowanej części spoiny od środka ciężkości grupy spoin O (rys. 5.8b).

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

Nośność dowolnego punktu spoin pachwinowych można sprawdzać z warunku na ścinanie, czyli wg wzoru:

$$\tau = \sqrt{\left(\tau_N + \tau_{M,xi}\right)^2 + \tau_{M,zi}^2} \le f_{vw,d}, \qquad (5.6)$$

gdzie:

$$\tau_N = \frac{N_{Ed}}{\sum A_{w,i}},$$

$$\tau_{M,x} = M_{Ed}\frac{z_i}{I_0},$$

$$\tau_{M,z} = M_{Ed}\frac{x_i}{I_0},$$

w najbardziej wytężonym punkcie A; $x_i = x_{\max}$, $z_i = z_{\max}$ (rys. 5.8c),

$\sum A_{w,i}$ - suma pól przekrojów spoin pachwinowych,

I_0 - biegunowy moment bezwładności grupy spoin: $I_0 = I_x + I_z$,

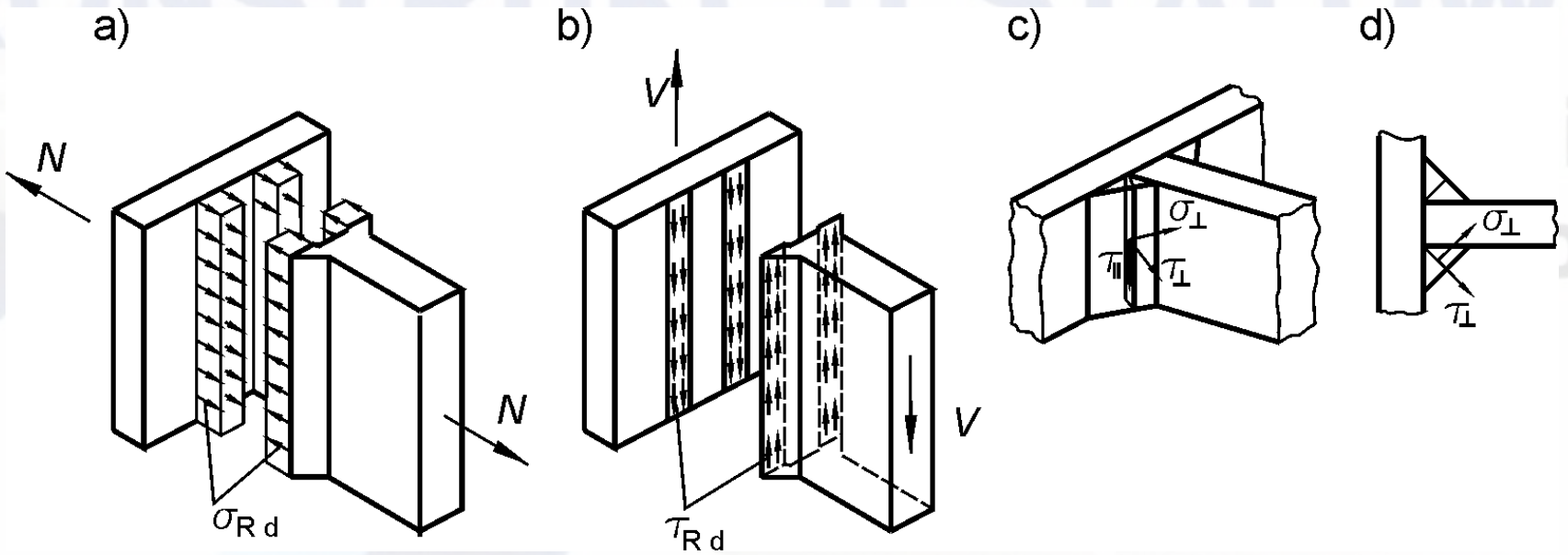
$f_{vw,d}$ - wytrzymałość spoiny na ścinanie (wzór 5.3).

Dla połączenia jak na rys. 5.8a moment zginający (skręcający) spoiny można obliczyć wg wzoru:

$$M_{Ed} = N_{Ed}\left(\frac{b}{2} - e\right).$$

5.3. Złącza teowe, krzyżowe ze spoinami pachwinowymi

Naprężenie w spoinach pachwinowych złącza teowego zależą od kierunku działającego obciążenia względem osi podłużnej (rys. 5.9).



Rys. 5.9. Naprężenia w spoinach pachwinowych złącza teowego

Przy złożonym obciążeniu np. łącznym działaniu sił N i V (rys. 5.9) na przekroje poprzeczne spoiny $A_w = \sum l_i \; a_i$ działają składowe:

$\sigma_\perp = \sigma_{Rd} \sin 45^0$ - naprężenie normalne prostopadłe do przekroju spoin,

$\tau_\perp = \sigma_{Rd} \cos 45^0$ - naprężenie styczne prostopadłe do lica spoiny,

$\tau_{II} = \tau_{Rd}$ - naprężenie styczne równoległe do przekroju spoiny,

Przy czym naprężenia:

$\sigma_{Rd} = \dfrac{N}{A_w}$ - przy prostym rozciąganiu (rys. 5.9a),

$\sigma_{Rd} = \dfrac{M_{Ed}}{W}$ - przy zginaniu spoiny,

$\tau_{Rd} = \dfrac{V}{\sum A_w}$ - przy prostym ścinaniu (rys. 5.9b).

Zgodnie z normą PN-EN 1993-1-8 nośność spoiny obliczać należy tzw. metodą kierunkową, wg wzorów:

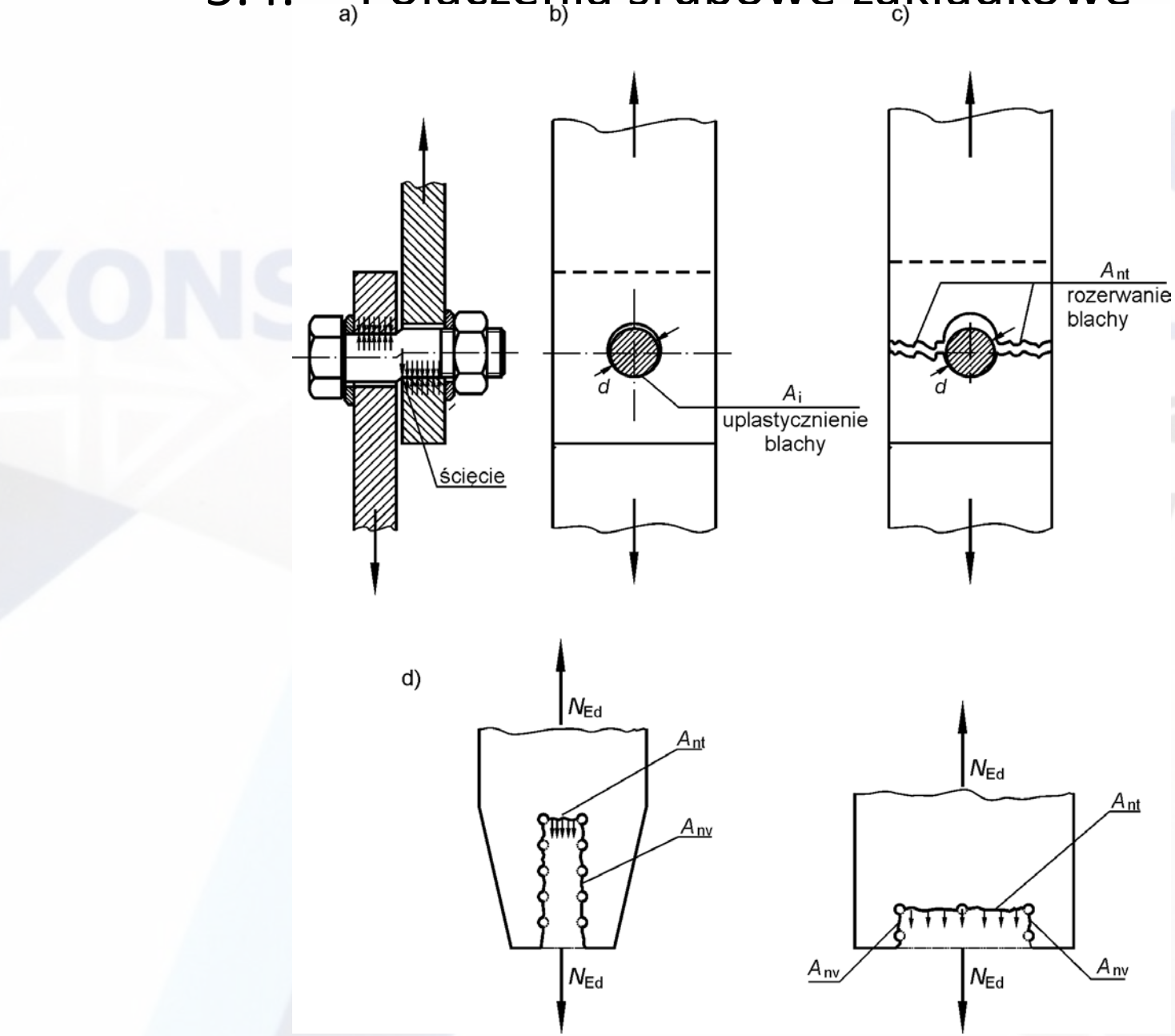
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_\perp^2 + 3\left(\tau_\perp^2 + \tau_{II}^2\right)} \le \frac{f_u}{\beta_w \, \gamma_{M2}}$$

oraz (5.8)

$$\sigma_\perp \le 0{,}9 \, \frac{f_u}{\gamma_{M2}},$$

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

5.4. Połaczenia śrubowe zakładkowe



Rys. 5.14. Mechanizmy zniszczenia połączenia zakładkowego

Dla zapewnienia wymaganej klasy niezawodności (EXC:1, 2, 3, 4) wykonania konstrukcji i związanej z nią poziomem jakości połączeń w normie PN-EN 1993-1-8 wprowadzono pięć kategorii połączeń, w tym kategorie A, B, C dla połączeń zakładkowych, D, E dla połączeń doczołowych.

Kategoria A

W połączeniach zakładkowych tej kategorii projektuje się śruby zwykłe lub pasowe klas 4.6 ÷ 6.8 i niesprężone klas 8.8 i 10.9 dla stanu granicznego ścinania $F_{v,Rd}$ i docisku $F_{b,Rd}$.

Kategoria B

Projektuje się połączenia zakładkowe cierne na śruby sprężone klasy 8.8 i 10.9:

– dla stanu granicznego nośności na docisk $F_{b,Rd}$,

– dla stanu granicznego użytkowalności na poślizg $F_{s,Rd,ser}$.

Kategoria C

Połączenia zakładkowe cierne na śruby sprężane klasy 8.8 i 10.9 pracujące w stanach granicznych:

– nośności na poślizg $F_{s,Rd}$,

– nośności na docisk $F_{b,Rd}$.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

Nośność śruby na ścinanie

Nośność obliczeniową na ścinanie w jednej płaszczyźnie (rys. 5.12a) śrub klasy 4.6 ÷6 i niesprężanych śrub klasy 8.8 i 10.9 zgodnie z PN-EN 1993-1-8 należy obliczać wg wzoru:

0

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \ f_{ub} \ A}{\gamma_{M2}}, \qquad (5.9)$$

gdzie:

f_{ub} - granica wytrzymałości stali śruby na rozciąganie,

α_v – współczynnik,

A – pole przekroju trzpienia śruby (części niegwintowanej),

γ_{M2} – częściowy współczynnik, można przyjmować $\gamma_{M2} = 1{,}25$.

Współczynnik α_v przyjmuje wartość:

- gdy pole przekroju śruby wynosi A, $\alpha_v = 0{,}6$
- gdy pole przekroju śruby jest rdzeniem śruby (części gwintowanej) A_s

  $\alpha_v = 0{,}6$ - dla śrub klas: 4.6, 5.6 i 8.8,

  $\alpha_v = 0{,}5$ - dla śrub klas: 4.8, 5.8, 6.8 i 10.9.

Nośność obliczenia nitów na ścinanie należy obliczać wg wzoru:

$$F_{v,Rd} = \frac{0{,}6 \ f_{ur} \ A_o}{\gamma_{M2}}, \qquad (5.10)$$

W tablicy 5.2 podano nośności na ścinanie śrub M10 ÷ M30 dla wszystkich klas przy jednej płaszczyźnie ścinania trzpienia na części niegwintowanej.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary Krakownicowe,
Słupy, ramownice

Tablica 5.2

Nośność obliczeniowa śrub na ścinanie w jednej płaszczyźnie na części niegwintowanej wg wzoru (5.9)

Śruba	Pole A [cm^2]	Pole A_s [cm^2]	Nośność obliczeniowa śruby na ścinanie $F_{v,Rd}$ [kN]						
			Klasa śruby						
			4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
M10	0,785	0,58	15,0	15,8	18,8	19,6	22,6	30,1	39,2
M12	1,13	0,843	21,7	22,8	27,1	28,2	32,5	43,4	56,4
M16	2,0	1,57	38,4	40,3	48,0	49,9	57,6	76,8	99,8
M20	3,14	2,45	60,3	63,3	75,4	78,4	90,4	173,6	156,9
M24	4,52	3,53	86,8	91,1	108,5	112,8	130,1	173,6	225,6
M30	7,065	5,61	135,6	142,4	169,5	176,3	203,5	271,3	352,7

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

Nośność śruby na docisk

Nośność śruby na docisk należy obliczać ze wzorów:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \, \alpha_b \, f_u \, d \, t}{\gamma_{M2}}, \tag{5.11}$$

gdzie:

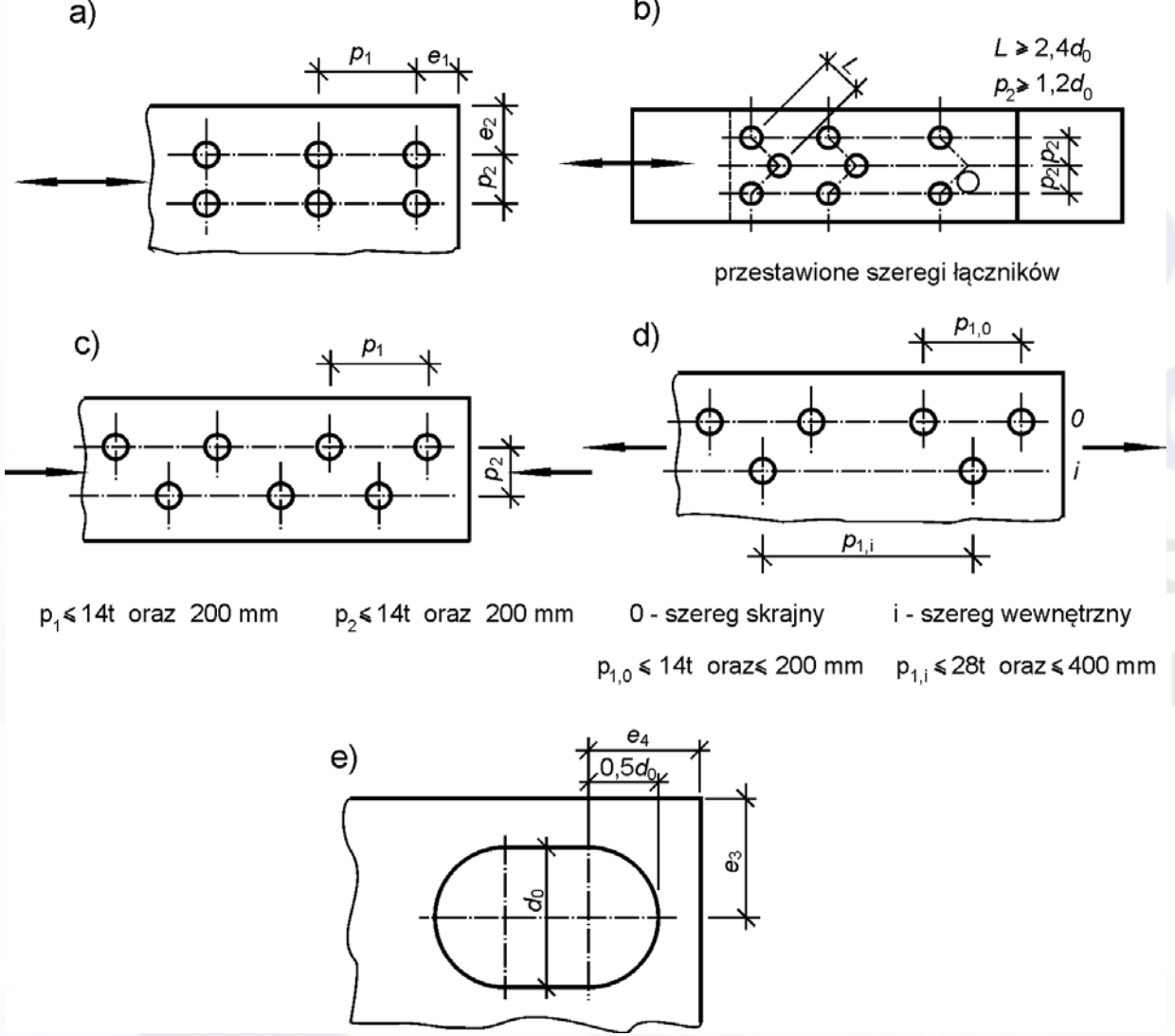
k_1 – współczynnik uwzględniający rozstaw śrub w kierunku prostopadłym do kierunku siły obciążającej

– dla śrub skrajnych

$$k_1 = 2{,}8 \frac{e_2}{d_o} - 1{,}7 \le 2{,}5, \tag{5.11a}$$

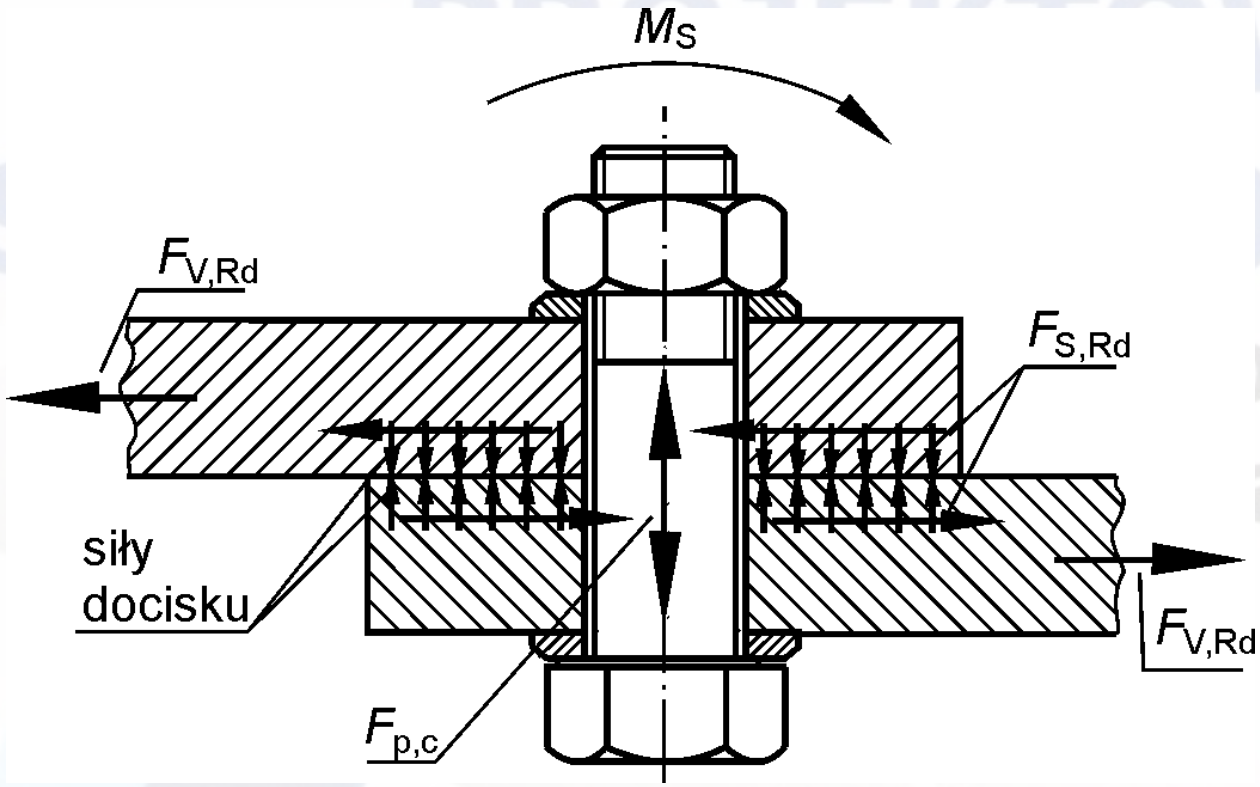
– dla śrub pośrednich

$$k_1 = 1{,}4 \frac{p_2}{d_o} - 1{,}7 \le 2{,}5, \tag{5.11b}$$



Rys. 5.15. Rozstawy otworów na śruby: a) symbole w układzie prostokątnym, b) symbole w układzie przestawionym, c) rozstawy śrub w elementach ściskanych, d) rozstawy śrub w elementach rozciąganych, e) odległości czołowe i boczne w przypadku otworów owalnych

5.4.3. Nośność obliczeniowa śrub sprężanych w ciernych połączeniach zakładkowych



Rys. 5.16. Mechanizm przenoszenia obciążeń w połączeniu ciernym

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Nośność śruby na poślizg styku należy wyznaczać ze wzoru:

– w stanie granicznym nośności

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s\, n\, \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,c}\,, \tag{5.14a}$$

– w stanie granicznym użytkowalności

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s\, n\, \mu}{\gamma_{M3,ser}} F_{p,c}\,, \tag{5.14b}$$

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Nośność połączeń zakładkowych niesprężanych kategorii A

Nośność połączeń zakładkowych na śruby niesprężane zwykłe, pasowane i wysokiej wytrzymałości klas 4.6 ÷ 10.9 lub nity, czyli połączeń kategorii A należy sprawdzać ze wzoru:

$$\frac{F_{Ed}}{n\ \beta_{Lf}\ F_{Rd}} \le 1;\ F_{Rd} = \min\begin{cases} F_{v,Rd} \text{ wg (5.9) i (5.10)} \\ F_{b,Rd} \text{ wg (5.11)} \end{cases} \qquad (5.15a)$$

gdzie:

n - liczba łączników,

β_{Lf} - współczynnik redukcji nośności złącz.

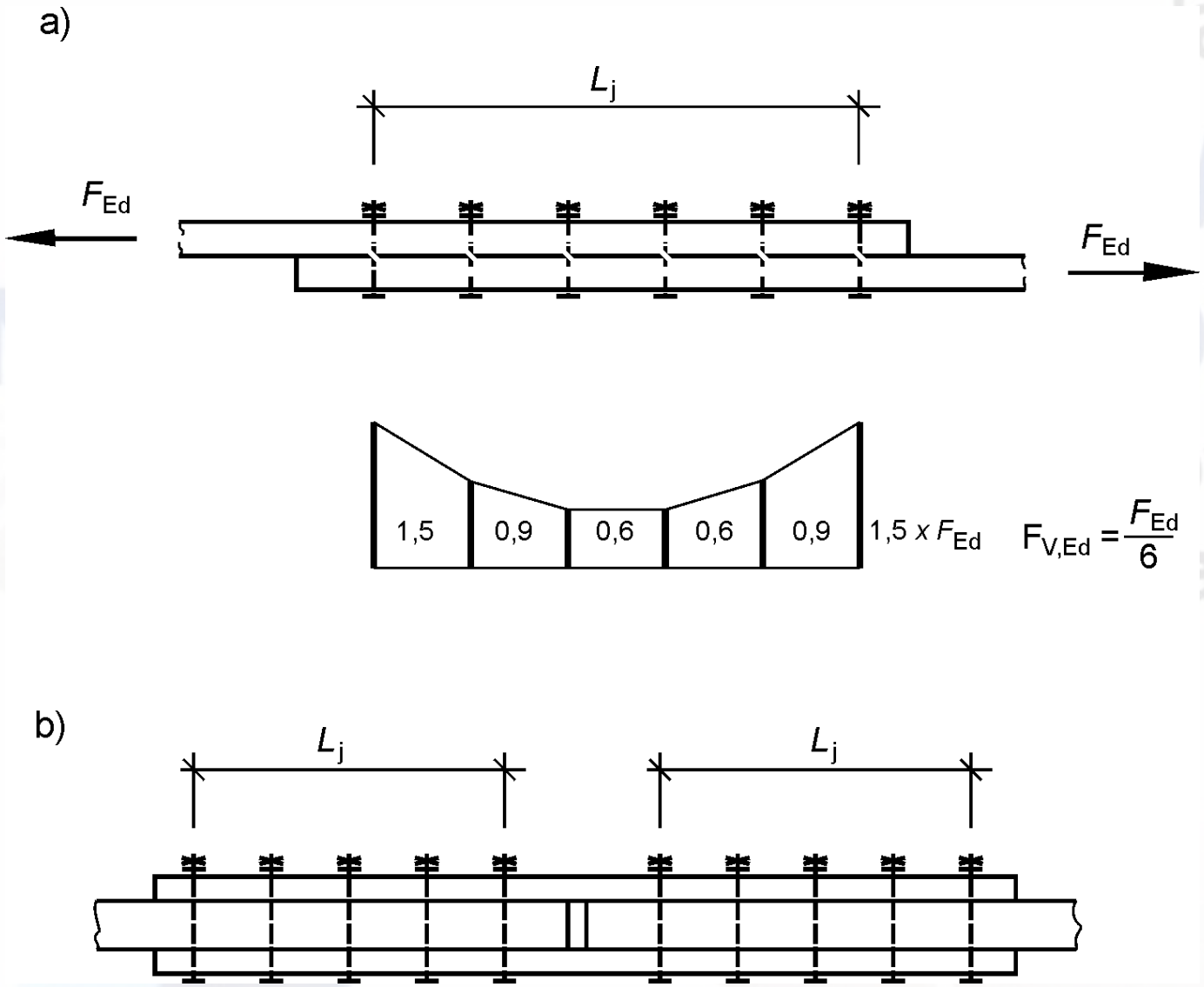
W normie PN-EN 1993-1-8 redukuje się długość połączenia L_j w kierunku równoległym do obciążenia (rys. 5.17), a mianowicie odległość L_j między skrajnymi łącznikami nie może być większa niż $15\,d$.

Jeżeli warunek ten jest niespełniony, to współczynnik redukcyjny należy obliczyć ze wzoru:

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15\,d}{200\,d}, \qquad (5.15b)$$

przy czym

$$1 \le \beta_{Lf} \le 0{,}75\,.$$



Rys. 5.17. Połączenia długie, rozkład sił obciążeniowych

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

Nośność połączeń zakładkowych sprężanych kategorii B

Nośność połączeń zakładkowych rozciąganych kategorii B oblicza się:

– w stanie granicznym nośności śrub wg wzoru (5.15),
– w stanie granicznym użytkowalności śrub wg wzoru:

$$\frac{F_{Ed,ser}}{n\,\beta_{Lf}\,F_{s,Rd,ser}} \le 1, \qquad (5.17)$$

gdzie:

$F_{Ed,ser}$ - obciążenie charakterystyczne (bez współczynników obciążenia),

n i β_{Lf} - jak we wzorze (5.15),

$F_{s,Ed,ser}$ - nośność śruby w stanie granicznym użytkowalności obliczana wg (5.14b).

Nośność połączeń zakładkowych ciernych kategorii C

Nośność połączeń zakładkowych kategorii C można obliczać wg wzoru (5.15) przyjmując:

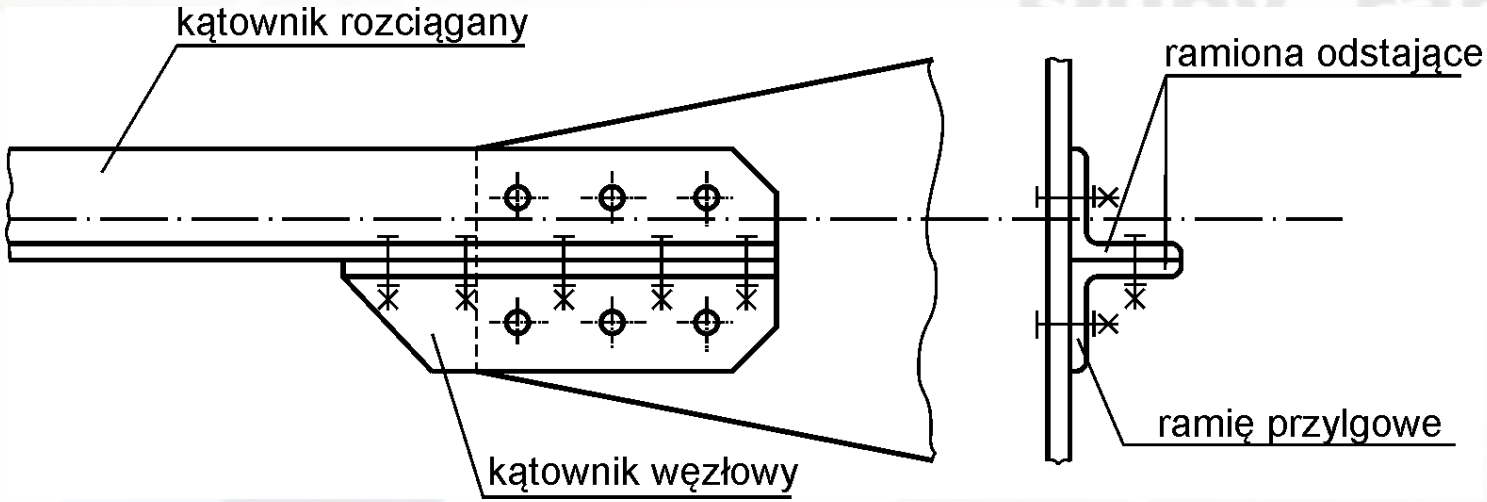
$$F_{Rd} = \min\begin{cases} F_{s,Rd} \text{ wg (5.14a)} \\ F_{b,Rd} \text{ wg (5.11)} \end{cases} \qquad (5.18)$$

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz. 1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Dodatkowe szczegółowe postanowienia normy PN-EN 1993-1-8

- Należy unikać projektowania połączeń zakładkowych z pojedynczymi łącznikami (śrubami, nitami). Jeśli jednak ze względów konstrukcyjnych lub eksploatacyjnych projektowany jest tylko jeden łącznik, to nośność obliczeniową tego łącznika należy obliczać zgodnie z dodatkowymi postanowieniami normy PN-EN 1993-1-8 p. 3.6.1,
- śruby lub nity łączące ramiona odstające kątownika rozciąganego i węzłowego (rys. 5.18) wymiaruje się na obciążenie 1,4 razy większe od siły przenoszonej przez przekrój netto ramienia odstającego kątownika rozciąganego,
- śruby lub nity łączące ramiona odstające kątowników węzłowych z półkami ceownika rozciąganego wymiaruje się na obciążenie 1,2 razy większe od siły przenoszonej przez przekrój netto półek ceownika rozciąganego,
- należy projektować co najmniej dwie śruby lub dwa nity łączące ramię przylgowe kątownika węzłowego z blachą węzłową,
- ramię przylgowe kątownika rozciąganego wymiaruje się na obciążenie 1,2 razy większe od obciążenia ramienia odstającego,

- kątowniki węzłowe łączące ceownik rozciągany wymiaruje się na siły 1,1 razy większe od sił w półkach ceownika,
- kątownik węzłowy powinien być zakończony równo z kątownikiem rozciąganym lub ceownikiem rozciąganym, a jego drugi koniec powinien sięgać poza strefę połączenia obu kątowników (rys. 5.18),
- mimośrody w węzłach (p. 2.7.2 normy PN-EN 1993-1-8) projektuje się na wynikowe momenty i siły.



Rys. 5.18. Złącze z kątownikiem węzłowym

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

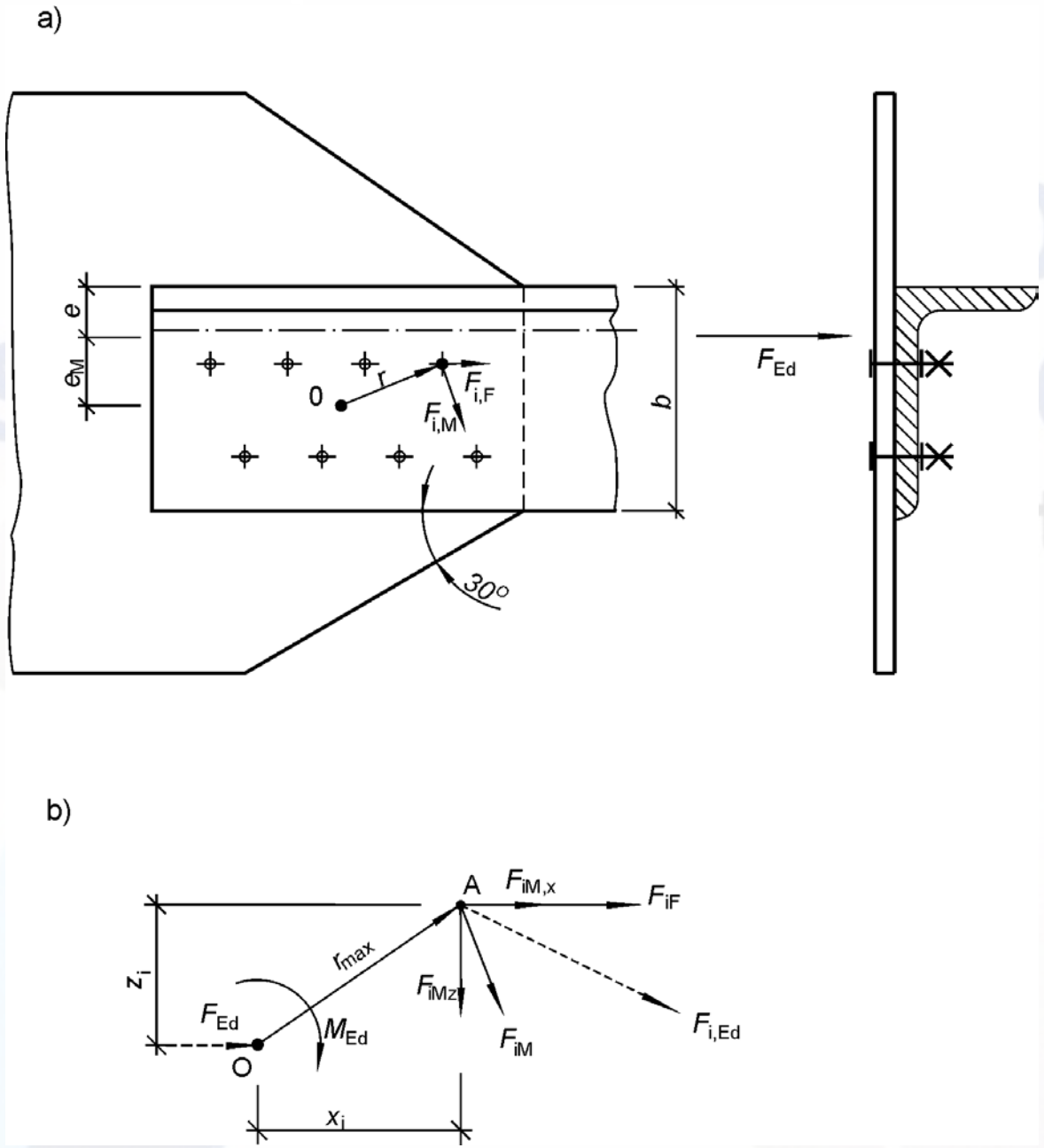
5.4.5. Połączenia zakładkowe z nierównomiernym obciążeniem łączników

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1993-1-8 p. 2.7 w węzłach z kątowników lub teowników łączonych jednym lub dwoma szeregami śrub należy w obliczeniach nośności uwzględniać każdy możliwy mimośród, czyli wynikowe momenty i siły działające zarówno na śruby i przekroje poprzeczne netto. Na rys. 5.19 pokazano połączenie z nierównomiernie obciążonymi śrubami. Działająca na połączenie, mimośrodowo siła F_{Ed} może zostać zastąpiona układem obciążenia: momentem zginającym M_{Ed} i siłą F_{Ed}.

Generowany moment zginający działający na połączenie można wyznaczyć ze wzoru:

$$M_{Ed} = e_M \; F_{Ed}, \tag{5.19}$$

gdzie e_M jest położeniem środka ciężkości pól przekrojów poprzecznych śrub.



Rys. 5.19. Obciążenie śrub z uwzględnieniem generowanych mimośrodami momentów

Jan Żmuda
KONS WANIE
OWYCH
townicowe,
ramownice

Zakładając, że w połączeniu zaprojektowano łączniki o tej samej średnicy, otrzyma się wzór na siłę w i - tym łączniku:

$$F_{iM} = \frac{M_{Ed}\ r_i}{\sum r_i^2}. \qquad (5.21)$$

Największe oddziaływanie generowane będzie w łączniku najdalej oddalonym od środka obrotu O.

Przyjmując $r_i^2 = x_i^2 + z_i^2$ można wyznaczyć składowe sił od momentu:

$$F_{iM,x} = \frac{M_{Ed}\ z_i}{\sum\left(x_i^2 + z_i^2\right)};\ F_{iM,z} = \frac{M_{Ed}\ x_i}{\sum\left(x_i^2 + z_i^2\right)}, \qquad (5.22)$$

w których x_i i z_i współrzędne łącznika względem punktu O obciążonego siłami $F_{iM,x}$, $F_{iM,z}$.

W układzie współrzędnych prostokątnych wypadkową obciążeń można obliczyć ze wzoru uogólnionego:

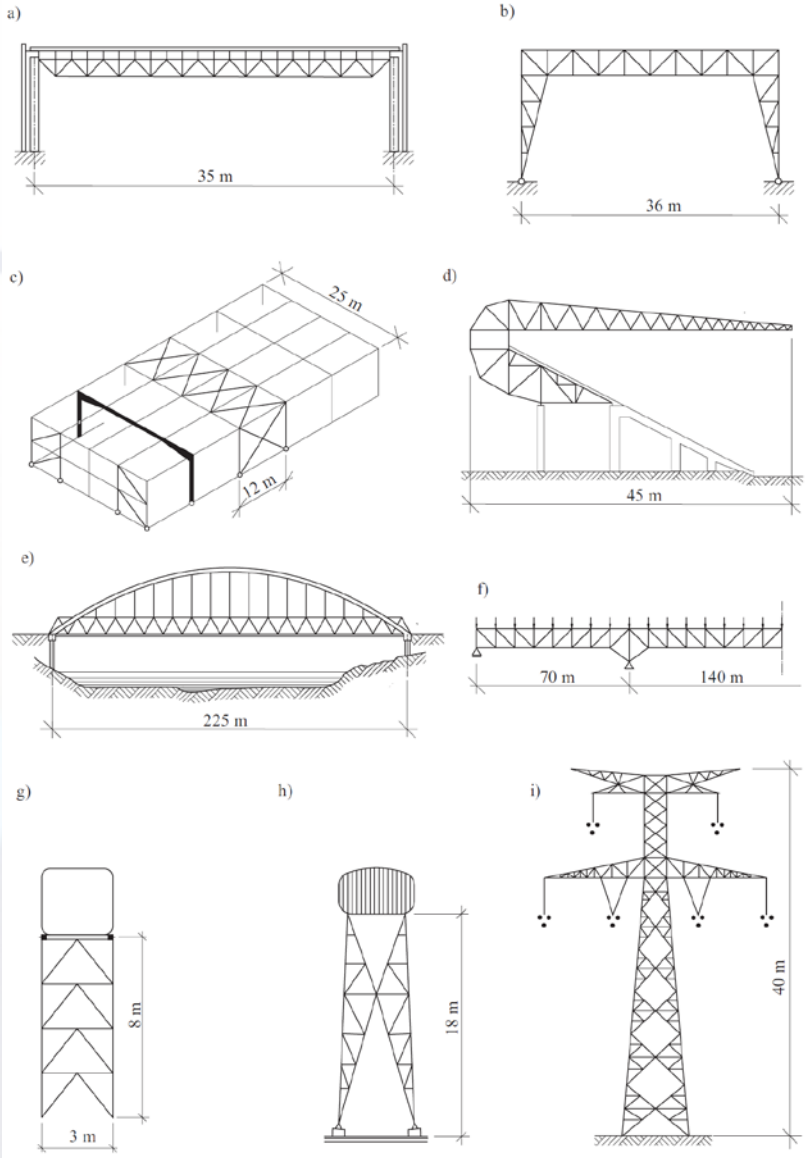
$$F_{i,Ed} = \sqrt{\left(F_{iM,x} + F_{iFx}\right)^2 + \left(F_{iM,z} + F_{iFz}\right)^2}\ . \qquad (5.23)$$

Dla układu obciążenia jak na rys. 5.19b $F_{iF,z} = 0$, $F_{iF,x} = F_{iF}$.

Nośność śrub w połączeniu obliczać należy wg wzoru 5.15 przyjmując $F_{Ed} = F_{i,Ed}$.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

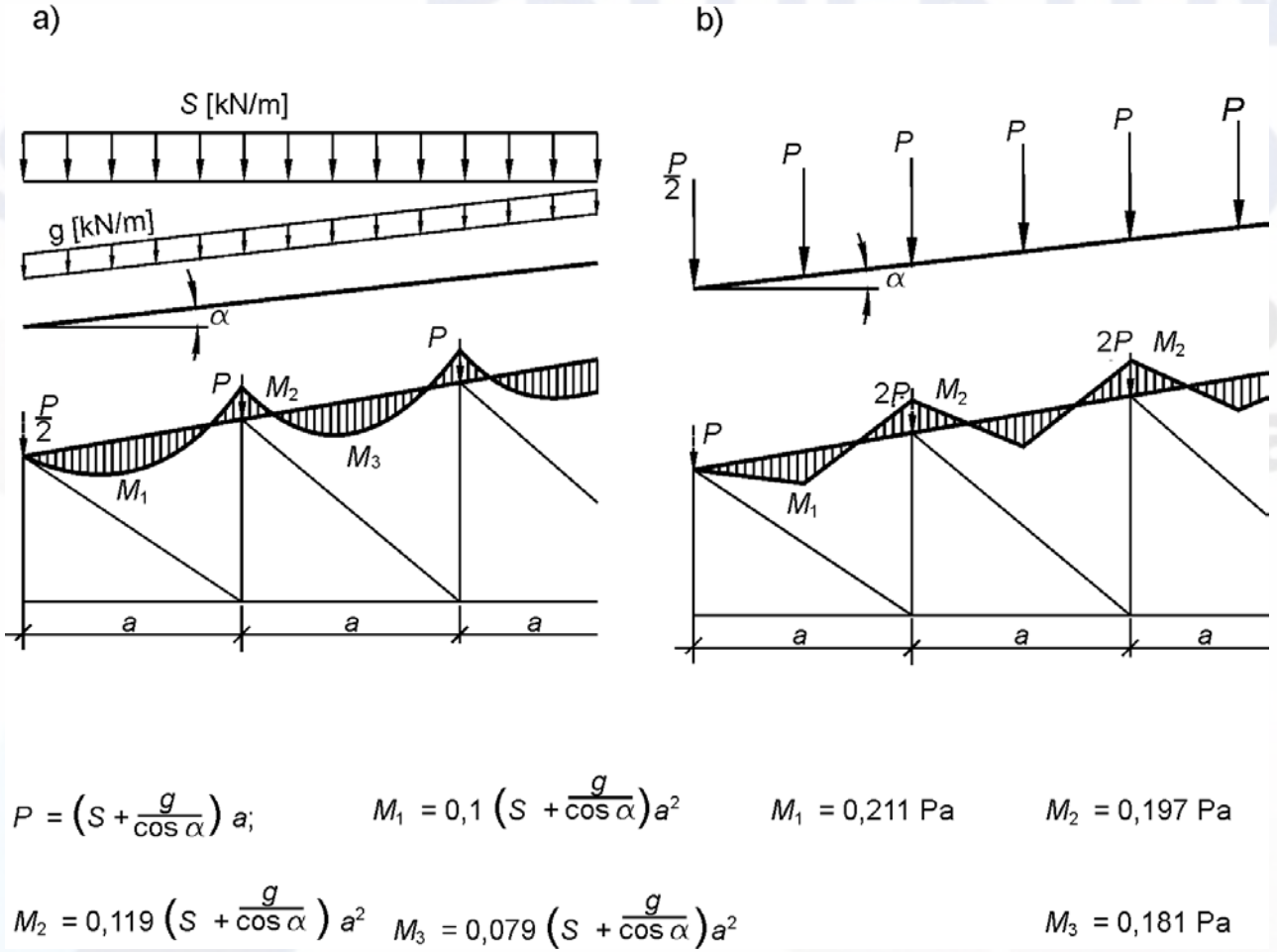
6. DŹWIGARY KRATOWNICOWE



Rys. 6.1. Kratownice: a) dźwigary dachowe hal murowanych, b) ramy szkieletowe budynków, c) stężenia dachowe i ścian hal, d) zadaszenia stadionów sportowych, e) dźwigary główne kolejowych mostów jednoprzęsłowych, f) dźwigary główne drogowych mostów wieloprzęsłowych, g) i h) podpory słupowe zbiorników i galerii transportowych, i) maszty i słupy sieci energetycznych

Jan Żmuda
KONST TOWANIE
ALOWYCH
kratownicowe,
ıpy, ramownice

6.3. Założenia, obciążenia, siły wewnętrzne



$$P = \left(S + \frac{g}{\cos\alpha}\right) a; \qquad M_1 = 0{,}1 \left(S + \frac{g}{\cos\alpha}\right) a^2 \qquad M_1 = 0{,}211\ Pa \qquad M_2 = 0{,}197\ Pa$$

$$M_2 = 0{,}119 \left(S + \frac{g}{\cos\alpha}\right) a^2 \qquad M_3 = 0{,}079 \left(S + \frac{g}{\cos\alpha}\right) a^2 \qquad M_3 = 0{,}181\ Pa$$

Rys. 6.8. Obciążenie między węzłami górnego pasa kratownicy: a) obciążenie rozłożone, b) obciążenie skupione

Wartości momentów zginających można także obliczać wg wzorów uwzględniających ich plastyczną redystrybucję (rozdz. 9, cz. 2). W sposób podobny oblicza się siły wewnętrzne w prętach pasa rozciąganego obciążonego siłami międzywęzłowymi. Nośność oblicza się jednak jak dla pręta rozciąganego i zginanego.

Siły wewnętrzne (osiowe) w prętach można obliczać metodami mieszanymi:

- przecięć Ritera,
- plan Cremony,
- równoważenia sił w węzłach,
- numerycznymi.

6.4. Ugięcia dźwigarów kratownicowych

Zgodnie z wymogami normy PN–EN 1993-1-1 należy sprawdzić ugięcie dźwigara kratownicowego. Wartość ugięcia można obliczyć metodą Maxwella – Mohra ze wzoru:

$$\delta = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i \; N_{1i} \; l_i}{E \; A_i} \le \delta_{\max} = \frac{L}{250}, \qquad (6.1)$$

w którym:

N_i siła w i – tym pręcie od kombinacji obciążeń charakterystycznych,

N_{li} siła w i – tym pręcie od obciążenia jednostkowego $P = 1$ przyłożona w węźle,

w kierunku obliczanego przemieszczenia,

l_1, A_i – długość i pole przekrojów poprzecznych prętów.

Ugięcie dźwigarów kratownicowych dwutrapezowych, o pasach równoległych można określić sposobem przybliżonym wg wzoru:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{q \; L^2}{E \; I_{zast}}, \qquad (6.2)$$

w którym

q – zastępuje obciążenie rozłożone (siła węzłowa/odległość między węzłami),

L – rozpiętość teoretyczna dźwigowa,

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

$$I_{zast} = m \frac{A_g A_d}{A_g + A_d} e^2, \qquad (6.3)$$

gdzie:

e - odległość między środkami ciężkości przekrojów pasa górnego i dolnego,

A_g, A_d - pola przekrojów pasa górnego i dolnego,

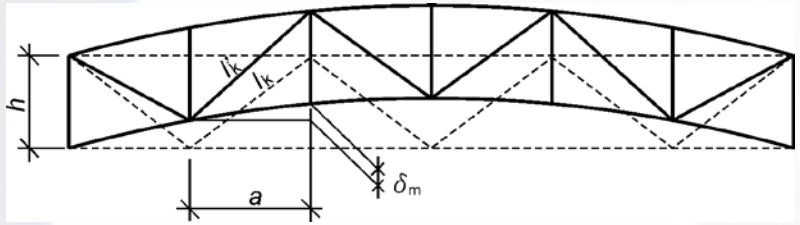
m - współczynnik redukcyjny równy: 0,9 dla pasów równoległych, 0,8 dla pasów o zbieżności 1:15, 0,7 dla pasów o zbieżności 1:10.

Dźwigarom kratowym o rozpiętości powyżej 30 m należy nadawać podniesienie wykonawcze (strzałkę odwrotną), aby po ich obciążeniu ugięcie nie przekraczało założonych wartości. Strzałkę odwrotną kratownicy δ_m konstruuje się na pełne obciążenie stałe (charakterystyczne) i połowę zmiennego obciążenia charakterystycznego, a jej kształt wyznacza się według paraboli drugiego stopnia:

$$\delta_m = \delta_g + 0{,}5\,\delta_q, \qquad (6.4)$$

gdzie:

δ_g, δ_q - ugięcie od obciążenia stałego g i zmiennego q.



Rys. 6.9. Konstrukcja strzałki odwrotnej dźwigara kratownicowego

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz. I Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

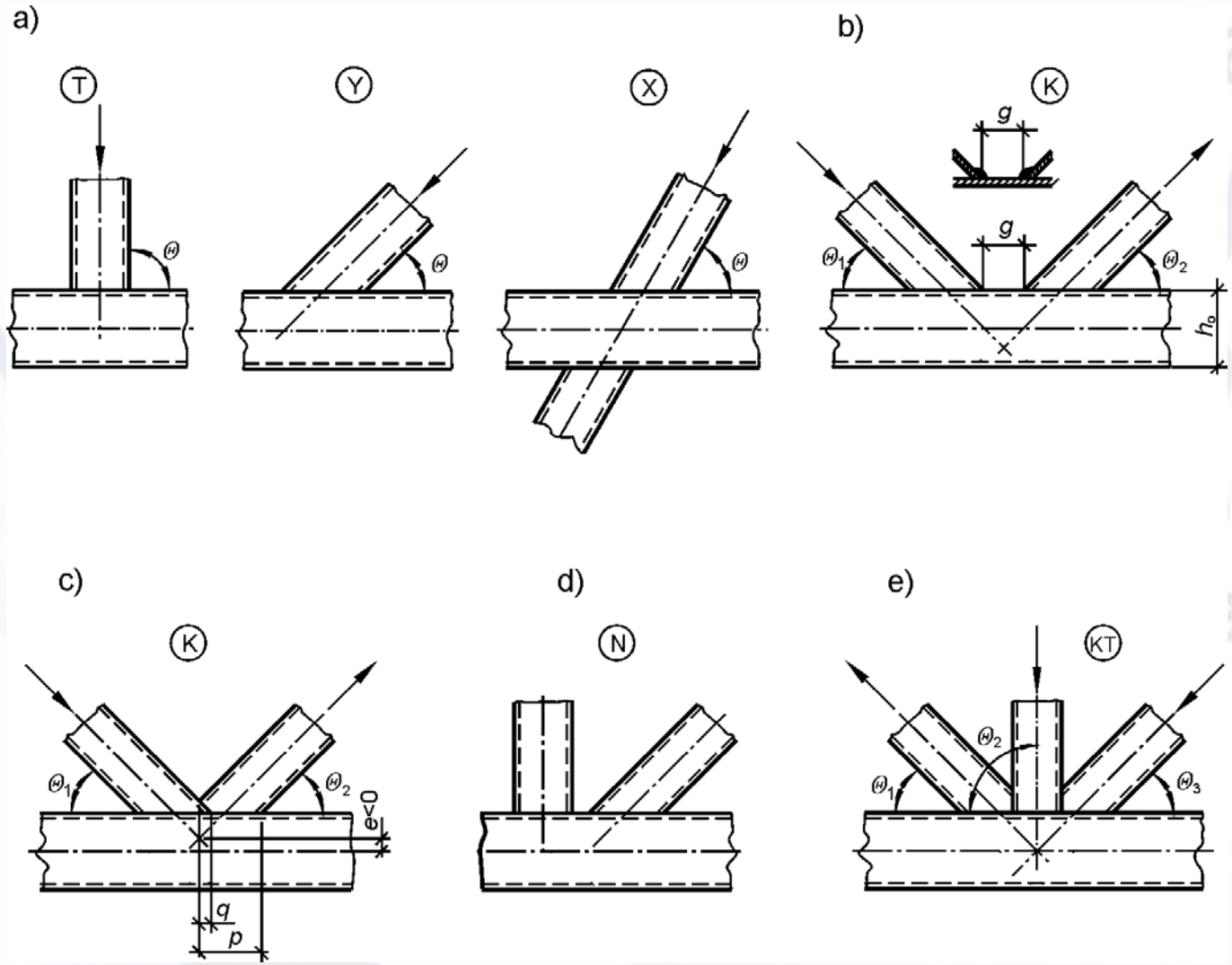
6.6. Kratownice z kształtowników rurowych

6.6.1. Uwagi ogólne

Kratownice z kształtowników rurowych, okrągłych – CHS lub prostokątnych – RHS, projektowane są najczęściej z węzłami bez blach węzłowych (rys. 6.12). Przekroje poprzeczne (walcowane na gorąco, ciągnione lub spawane) stosowane są częściej na maszty i wieże, słupy linii energetycznych, dźwignice, rzadziej na wiązary dachowe, dźwigary mostowe.

Wykonywanie węzłów z rur okrągłych jest dość skomplikowane, gdyż wycinanie brzegów (rowków) do spawania wymaga stosowania technik cieplnych na drogich urządzeniach numerycznych. Brzegi rur prostokątnych można wycinać piłami tarczowymi lub przecinarkami.

Jan Żmuda PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



Rys. 6.12. Wybrane typy węzłów kratownicy z prętów prostokątnych (RHS): a) węzły typu T, Y, X, b) węzeł typu K z odstępem g, c) węzeł typu K z zakładką, d), e) węzły typu N, KT

6.6.2. Warunki projektowania kratownic z rur

W projektowaniu prętów i węzłów kratownic z rur należy uwzględnić zgodnie z normą PN – EN 1993 – 1 – 8, podrozdział 5.1.5 i 7.1 następujące warunki:

a) podobnie jak w przypadku kratownic z prętami o przekrojach otwartych, zakłada się, że linie środków ciężkości krzyżulców i słupków oraz pasów kratownic z rur przecinają się w punktach przegubowych tworzących siatkę geometryczną kratownicy,

b) kratownice z rur obciążone są w przegubach węzłów siłami skupionymi działającymi w płaszczyźnie kratownic,

c) pas górny lub dolny kratownicy z rur może być także obciążony siłami skupionymi lub rozłożonymi w płaszczyźnie kratownicy, jak też w kierunku prostopadłym. Siły wewnętrzne (osiowe, momenty zginające) oblicza się wg wytycznych podanych w p. 6.3. Momenty zginające nie przekazują się na krzyżulce i słupki,

d) granica plastyczności stali prętów z rur powinna nie przekraczać wartości 460 MPa ($f_y \leq 460\ \text{MPa}$),

e) grubość ścianki krzyżulca lub słupka, t_1 powinna być większa lub równa 2,5 mm ($t_1 \geq 2{,}5\ \text{mm}$),

f) grubość ścianki rury projektowanej na pas kratownicy t_0 powinna być mniejsza lub równa 25 mm ($t_0 \leq 25\ \text{mm}$),

a) ściskane pręty z rur powinny spełniać wymagania ścianek o klasie przekroju 1 lub 2, zgodnie z PN – EN 1993 – 1 – 1 (rys. 6.12),

b) kąty między krzyżulcami a pasami nie powinny być mniejsze niż 30^0 ($\theta \geq 30^0$),

c) ze względu na warunki spawania odstęp między krzyżulcami $g \geq t_1 + t_2$, gdzie t_1, t_2 grubości ścianek rur (rys.6.12b),

d) w węzłach zakładkowych (rys. 6.12c) wzajemna zakładka powinna wynosić 25 %, przy czym:

p – długość rzutu na powierzchni pasa styku pręta zakrywanego, przy pominięciu pręta zakrywanego (rys. 6.12c),

q – długość zakładki, mierzona na powierzchni pasa, między prętami skratowania w węźle typu K lub N (rys. 6.12c),

$\lambda_{ov} = (q / p) \cdot 100\%$ - pokrycie zakładki.

Połączenie z powierzchnią pasa sprawdza się na ścinanie w przypadkach, gdy zakładka przekracza wartość $\lambda_{ov,\lim} = 60\%$, a zakryty styk krzyżulca nie jest przyspawany lub gdy zakładka przekracza wartość $\lambda_{ov,\lim} = 80\%$, a styk zakryty krzyżulca jest przyspawany albo gdy krzyżulce zaprojektowano z rur prostokątnych o wymiarach $h_i < b_i$ lub $h_j < b_j$,

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

a) momenty zginające spowodowane sztywnością obrotową węzłów (mimośrodami) można pomijać zarówno przy obliczeniach nośności prętów, jak i węzłów pod warunkiem, że spełnione są warunki:
   - geometria węzła jest zgodna z odpowiednimi ograniczeniami wyszczególnionymi w tablicach 7.1, 7.8, 7.9, 7.20 normy PN–EN–1993–1–8,
   - stosunek długości teoretycznej l_1 do wysokości h_0 (d_0) przekroju poprzecznego pręta jest nie mniejszy od 6, czyli $l_1 / h_0 \geq 6$,

b) przy sprawdzaniu nośności pasów, skratowań rozciąganych i połączeń momenty zginające wynikające z mimośrodów można pominąć, gdy spełniają warunki:
   - $0{,}55\, d_0 \leq e \leq 0{,}25\, d_0$ (kratownice CHR) (6.5a)
   - $0{,}55\, h_0 \leq e \leq 0{,}25\, h_0$ (kratownice RHR) (6.5b)
   - gdzie:

     e - mimośród określony wg oznaczeń na rys. 6.13,

     d_0 - średnica pasa o przekroju okrągłym,

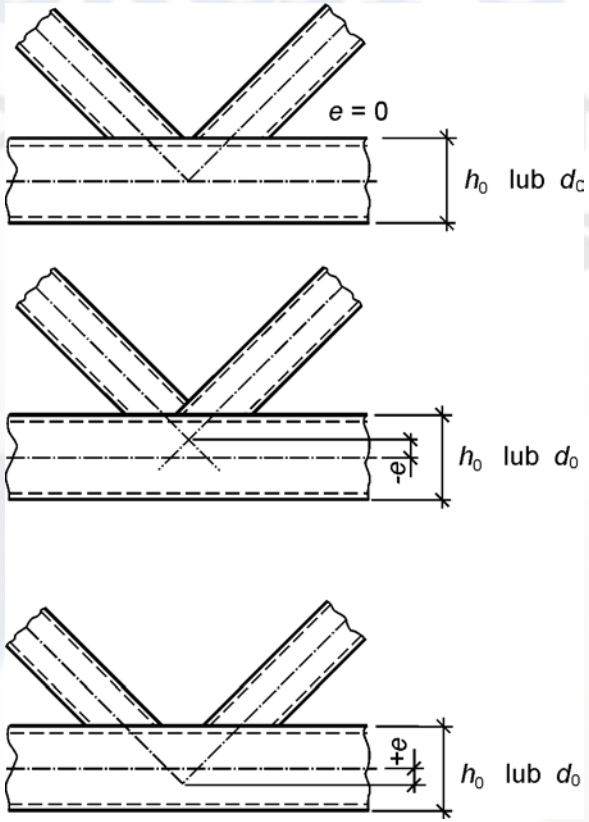
     h_0 - wysokość pasa o przekroju prostokątnym,

c) przy sprawdzaniu nośności pasa ściskanego kratownicy należy uwzględnić dowolne mimośrody również określone wg wzorów (6.5). Momenty zginające wywołane mimośrodami należy rozdzielić między ściskane pręty pasa, zbiegające się w węźle, proporcjonalnie do ich sztywności względnych I / l_i, gdzie l_i jest długością teoretyczną pręta, a I momentem bezwładności przekroju poprzecznego pręta,

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

a) jeżeli wartości mimośrodów nie są zawarte w przedziale określonym wg (6.5), to momenty zginające od tych mimośrodów należy uwzględnić przy określeniu nośności wszystkich prętów (rozciąganych i ściskanych) zbiegających się w węźle, przy czym wartości momentów zginających obciążających poszczególne pręty należy rozdzielić według ich sztywności względnych I / L,

b) przy obliczeniu nośności pasa należy także uwzględnić wpływ momentów zginających od mimośrodów w obliczaniu współczynników k_m, k_0, k_p (tablice 7.2 ÷ 7,14 normy PN–EN 1993–1–8).



Rys. 6.13. Mimośrody w węzłach

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
kratownicowe,
słupy, ramownice

6.6.4. Nośności obliczeniowe prętów kratownic z rur

Nośność przekrojów poprzecznych przy węzłowych pasów należy sprawdzać wg wzorów:

$$\frac{\sigma_{o,Ed}}{f_{yo}\ \gamma_{M5}} \le \text{dla pasów z RHS}, \tag{6.6a}$$

$$\frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{yo}\ /\ \gamma_{M5}} \le 1, \text{dla pasów CHS}, \tag{6.6b}$$

przy czym:

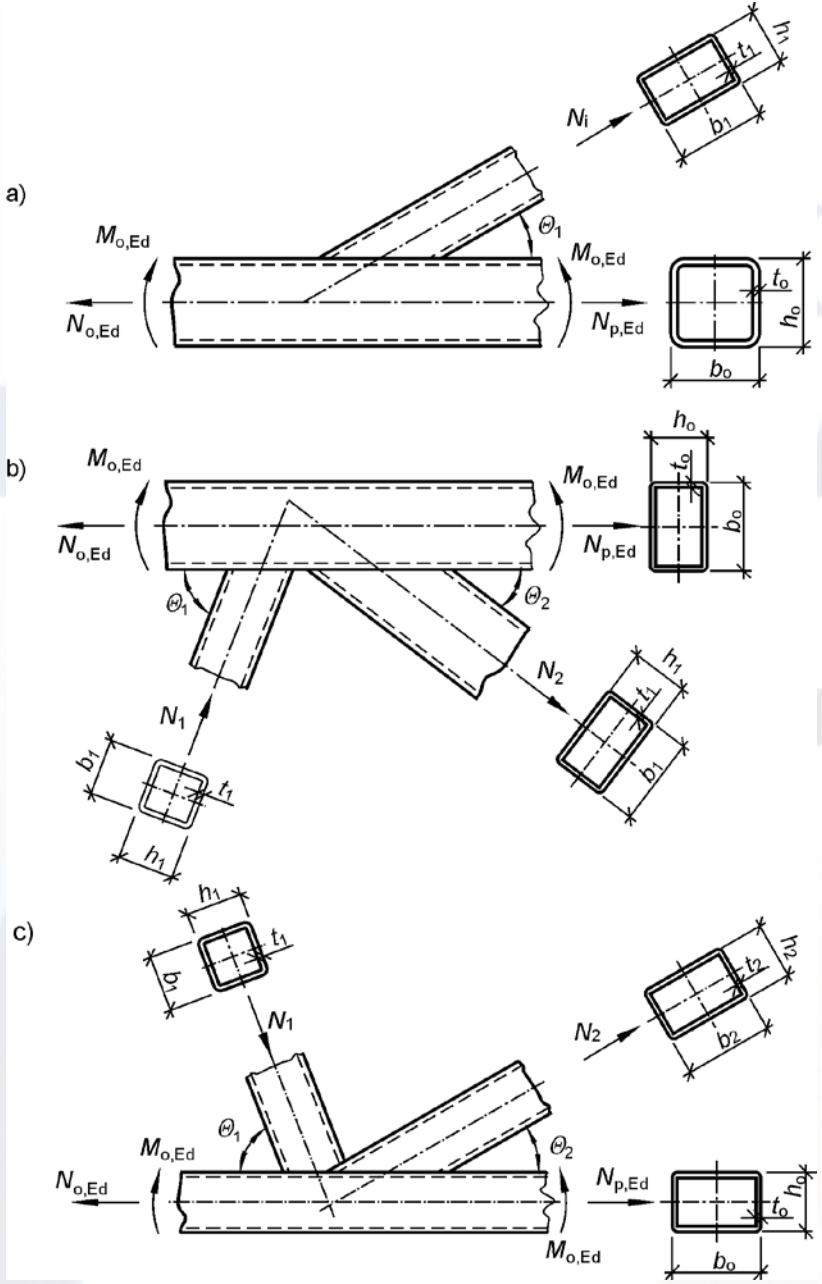
$$\sigma_{o,Ed} = \frac{N_{o,Ed}}{A_o} + \frac{M_{o,Ed}}{W_{el,o}}, \tag{6.7a}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_o} + \frac{M_{o,Ed}}{W_{el,o}}, \tag{6.7b}$$

gdzie $N_{p,Ed} = N_{o,Ed} - \sum_{i>0} N_{i,Ed}\ \cos\theta_i$.

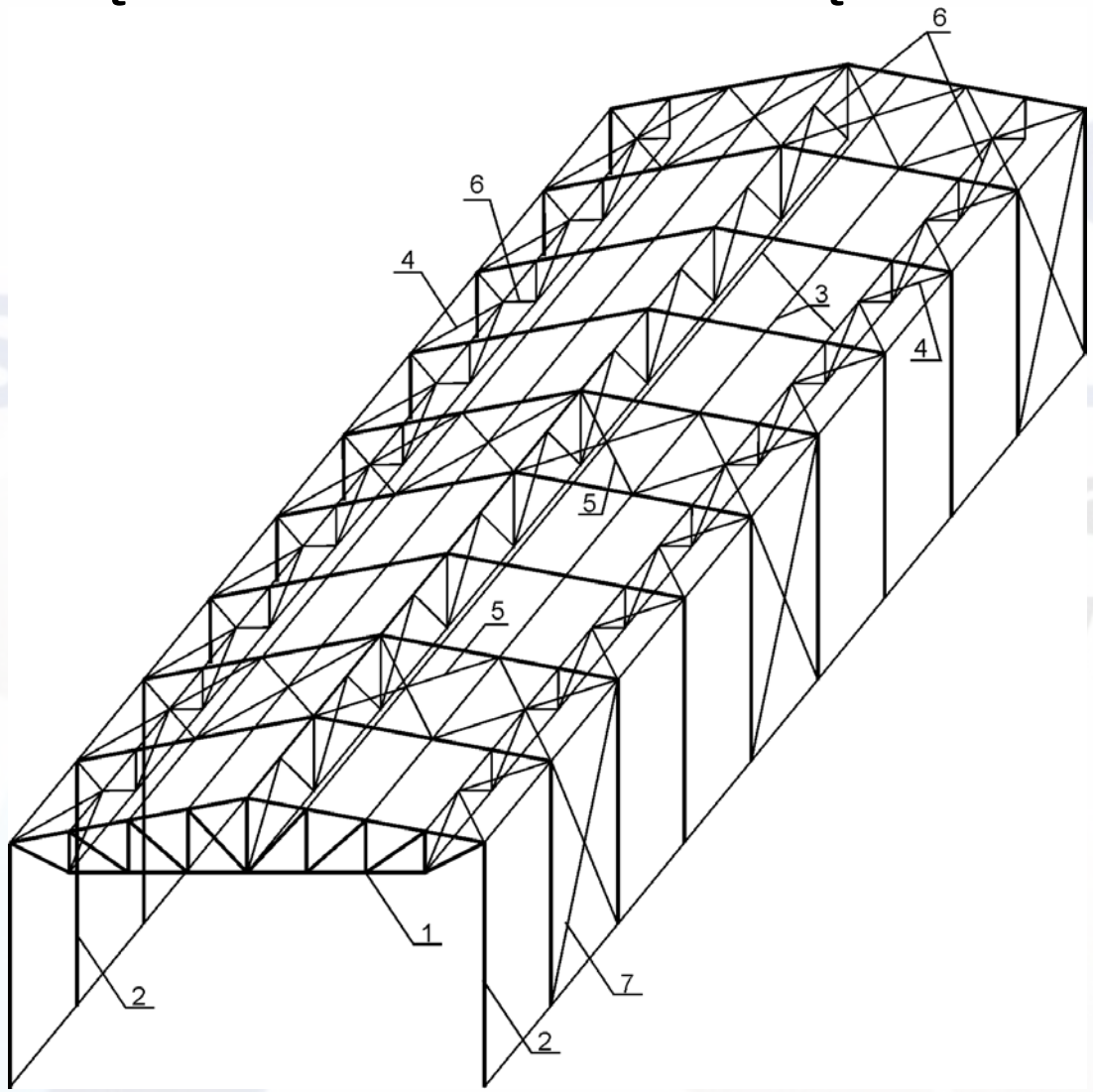
Obciążenie przywęzłowe $N_{i,Ed}$, $M_{i,Ed}$ pokazano na rys. 6.14.

Jan Żmuda PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



Rys. 6.14. Wymiary i obciążenia wybranych typów węzłów kratownic z kształtowników rurowych: a) węzeł typu Y, b) węzeł typu L z odstępem, c) węzeł typu K z zakładką

6.7. Stężenia kratownicowe wiązarów dachowych



Rys. 6.16. Stężenie kratownicowe: 1 – wiązary dachowe, 2 – słupy, 3 – płatwie, 4 – stężenia połaciowe podłużne, 5 – stężenia połaciowe poprzeczne, 6 – stężenie pionowe, 7 – stężenie międzysłupowe

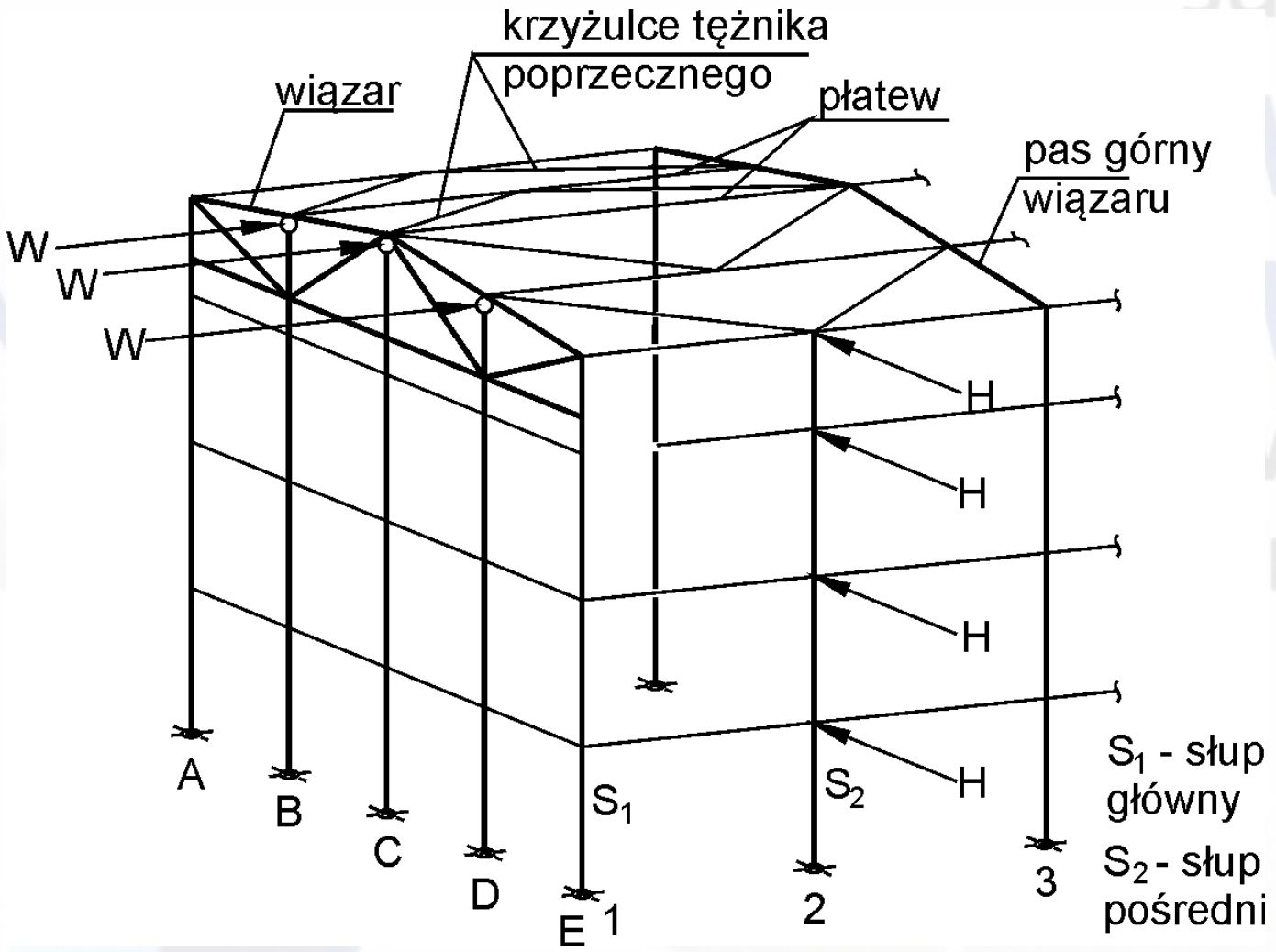
6.7.2. Stężenie połaciowe poprzeczne

Stężeniem połaciowym poprzecznym jest najczęściej kratownica o kształcie prostokątnym, której pasy są pasami górnymi wiązarów dachowych a słupkami płatwie.

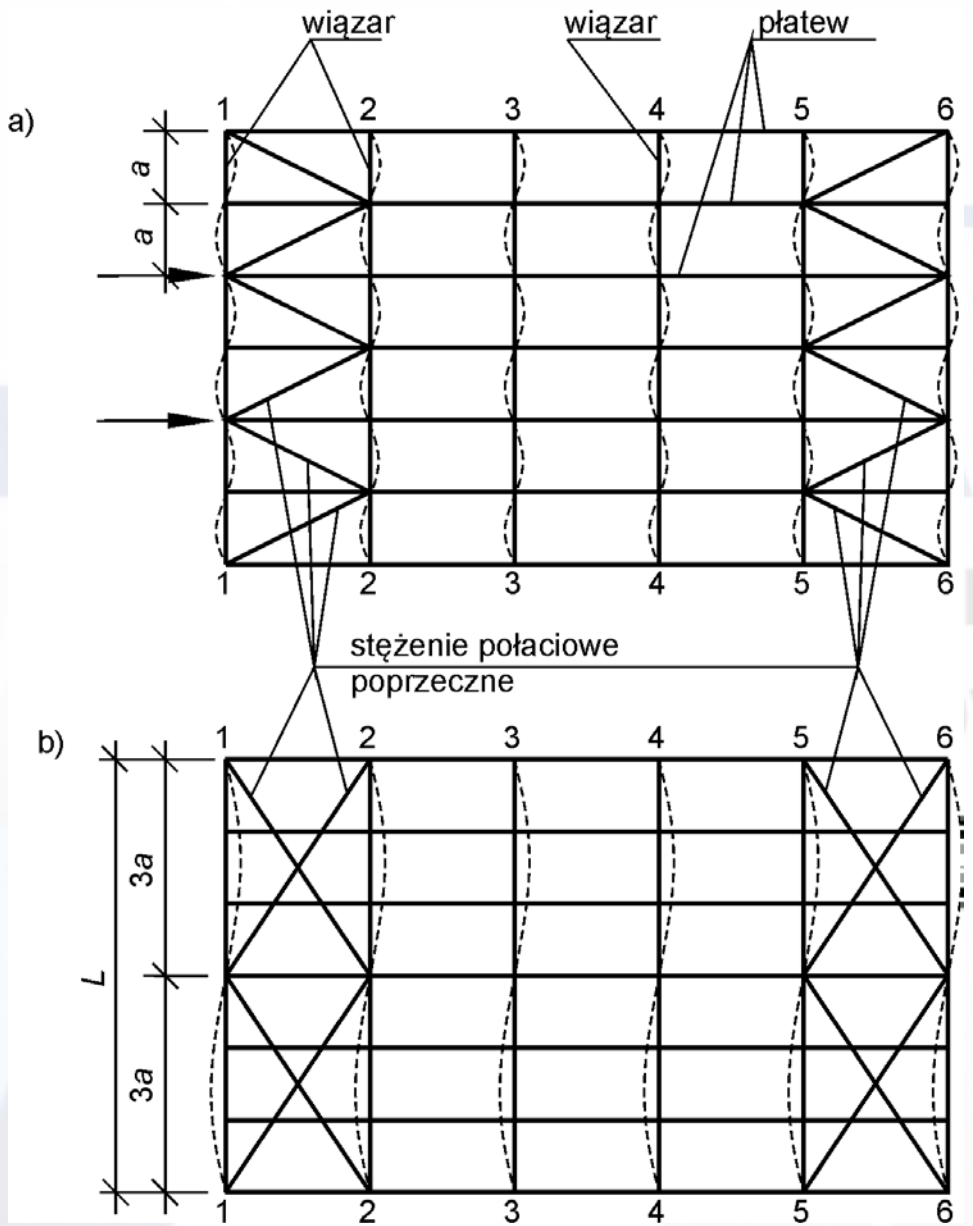
Rola stężenia w konstrukcji dachu

Zadania tężników są następujące:

- przejmowanie sił od parcia wiatru na ścianę szczytową hali (rys. 6.17)
- zmniejszanie długości wyboczeniowych pasów górnych wiązarów (rys. 6.18)
- łącznie z tężnikami połaciowymi podłużnymi tworzą zamknięty wieniec usztywniający w płaszczyźnie połaci wszystkie wiązary dachowe i płatwie, a zatem zapewniają geometryczną niezmienność połaci dachu.



Rys. 6.17. Obciążenie od wiatru stężeń połaciowych poprzecznych



Rys. 6.18. Schematy dopuszczalnych deformacji pasów górnych wiązarów dachowych w zależności od rodzaju tężników poprzecznych połaciowych

Podporami stężeń połaciowych poprzecznych są górne końce słupów hali (rys. 6.16, 6.17). Siatkę geometryczną stężenia połaciowego poprzecznego usytuowanego w polu skrajnym dachu i obciążenia pokazano na rys. 6.19.

Równoważne obciążenie stabilizujące jest sumą obciążenia od imperfekcji początkowej i od ugięć poziomych spowodowanych zewnętrznymi obciążeniami np. wiatru działającego na ścianę szczytową i obciążenia stabilizującego wynikającego z imperfekcji początkowej:

$$q_d = q_{deo} + q_{d,\delta}, \tag{6.8}$$

$$q_{deo} = \sum_{i=1} 8\, N_{Ed}\, \frac{e_o}{L}, \tag{6.8a}$$

$$q_{d,\delta} = \sum_{i=1} 8\, N_{Ed}\, \frac{\delta}{L}, \tag{6.8b}$$

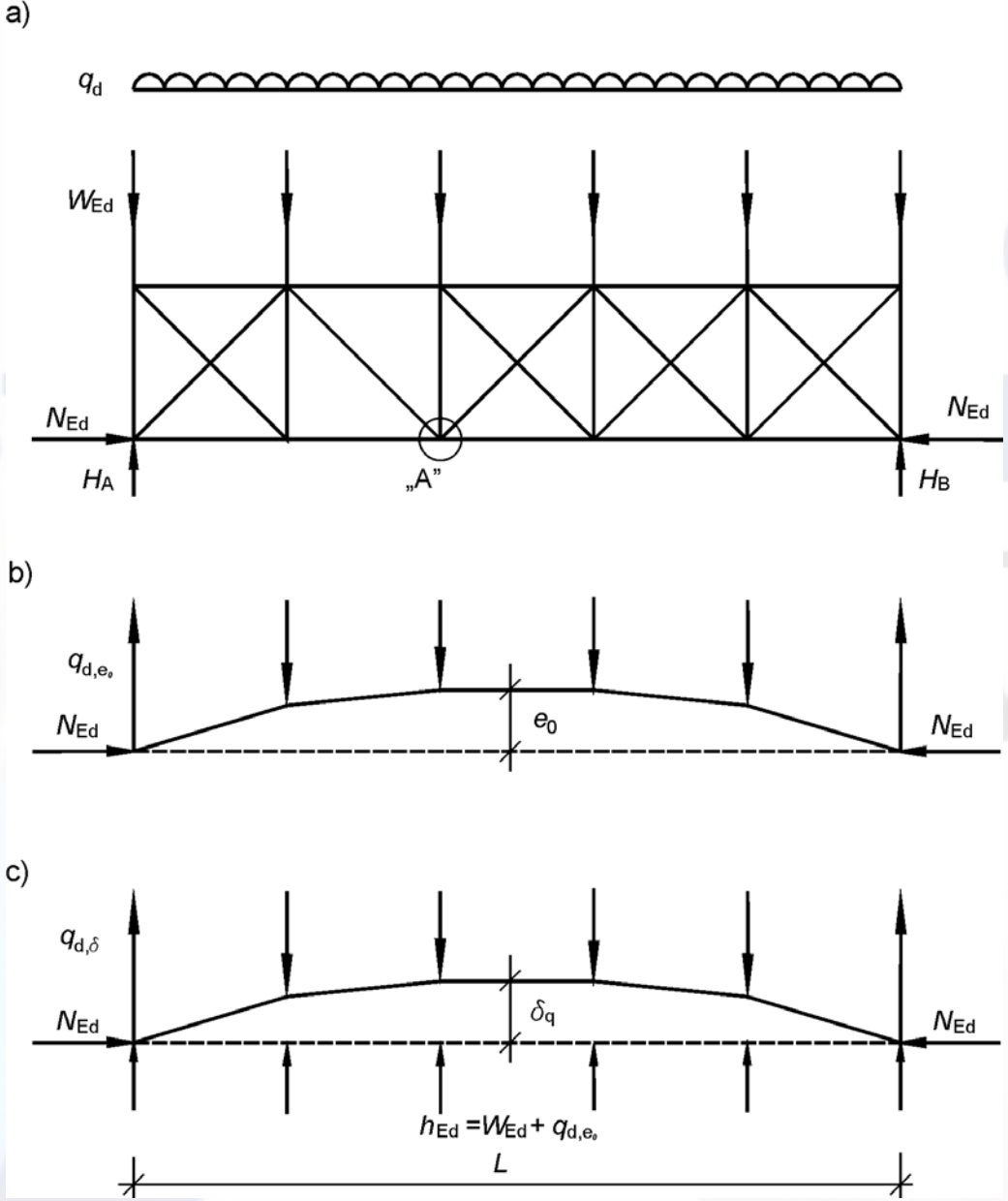
gdzie:

e_o – wstępna imperfekcja łukowa, pozioma pasa ściskanego wiązara dachowego

$$e_o = a_m \frac{L}{500}, \quad a_m = \sqrt{0{,}5\left(1+\frac{1}{m}\right)}, \tag{6.9}$$

m – liczba wiązarów stężonych przez połaciowe stężenie poprzeczne,

δ – ugięcie poziome stężenia poziomego od obciążenia wiatrem i obciążeniami

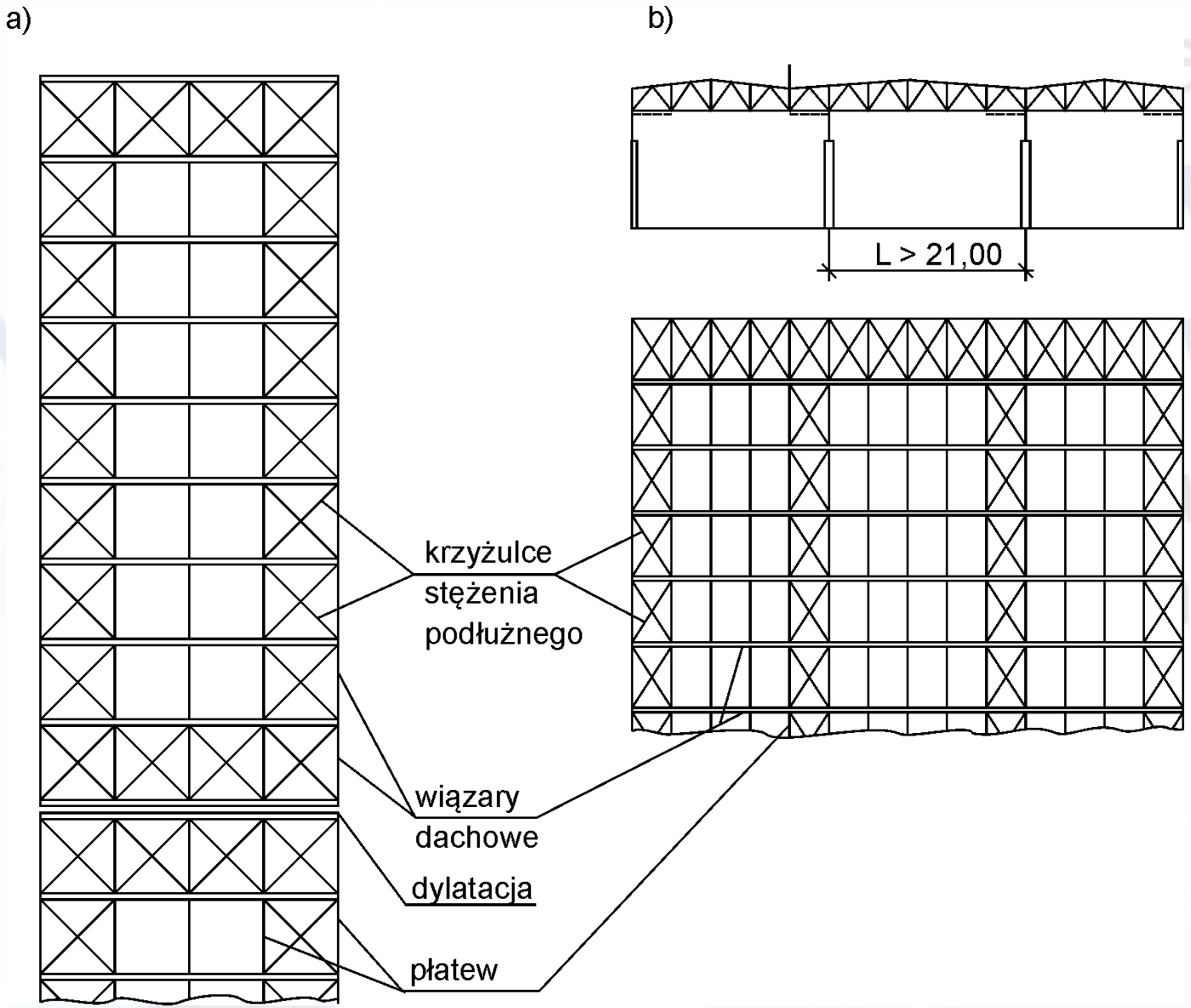


Rys. 6.19. Siatka geometryczna i obciążenie poprzecznego stężenia połaciowego: a) schemat obciążenia, b) równoważne obciążenie stabilizujące od imperfekcji, c) równoważne obciążenie stabilizujące od działania wiatru i obciążenia q_{deo}

6.7.3. Stężenie połaciowe podłużne

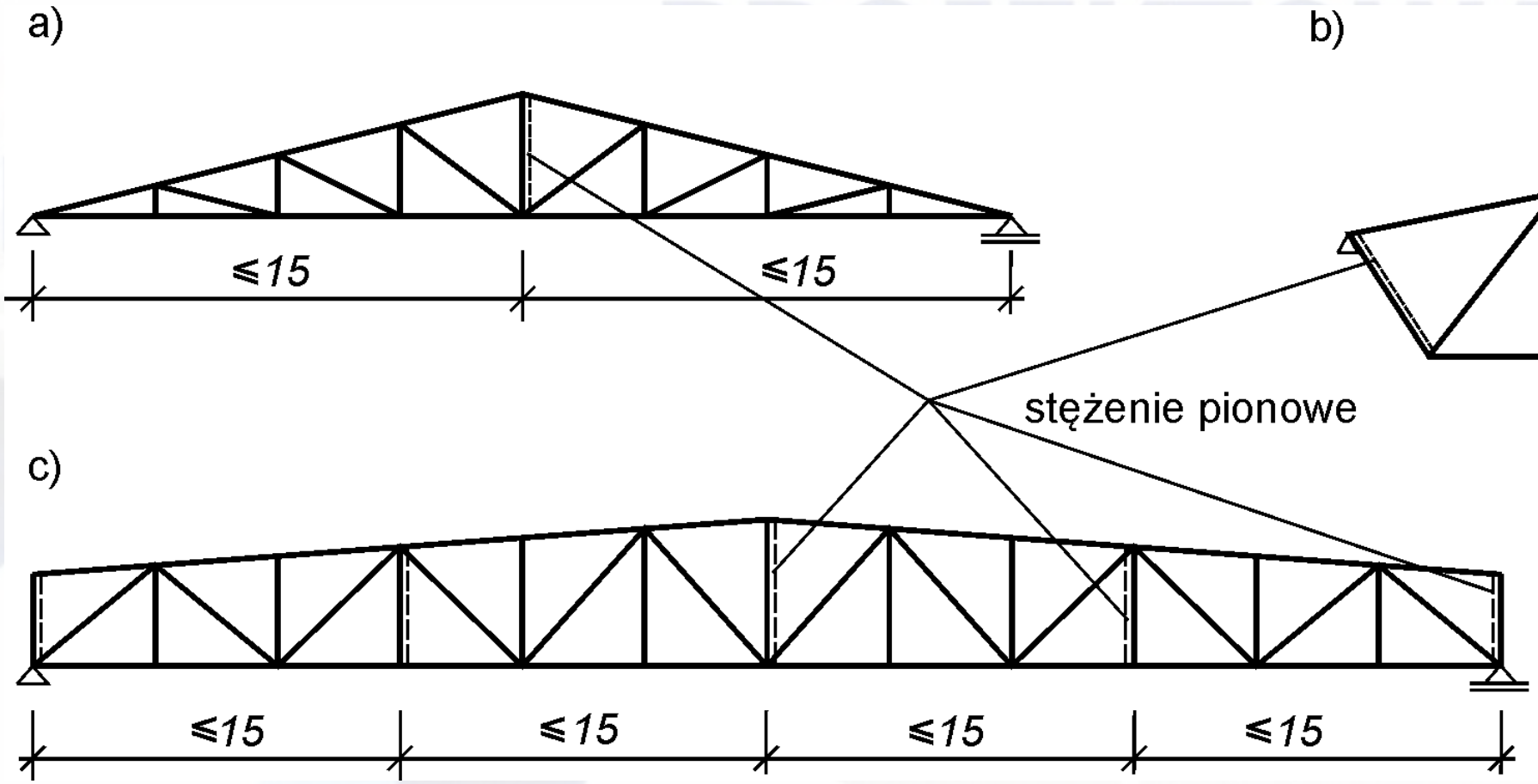
- stanowią podparcie słupów pośrednich bocznej ściany ryglowej (rys. 6.17) i przekazują te obciążenia na słupy główne w polach międzywiązarowych, bez stężeń połaciowych poprzecznych,
- uniemożliwiają przemieszczenie się górnych końców słupów oraz (z wiązarami) w kierunku podłużnym, czyli wpływają na zmniejszenie długości wyboczeniowych słupów w kierunku podłużnym czyli w kierunku osi y,
- zabezpieczają przed utratą stateczności górne pasy podciągów (w halach o dużych rozstawach podłużnych słupów),
- wraz z tężnikami poprzecznymi tworzą wieniec usztywniający połacie dachowe (rys. 6.21a).

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



Rys. 6.21. Schematy rozmieszczenia stężeń: a) połaciowych podłużnych w hali jednonawowej, b) podłużnych na poziomie pasów dolnych w hali wielonawowej

6.7.4. Stężenia pionowe podłużne wiązarów dachowych



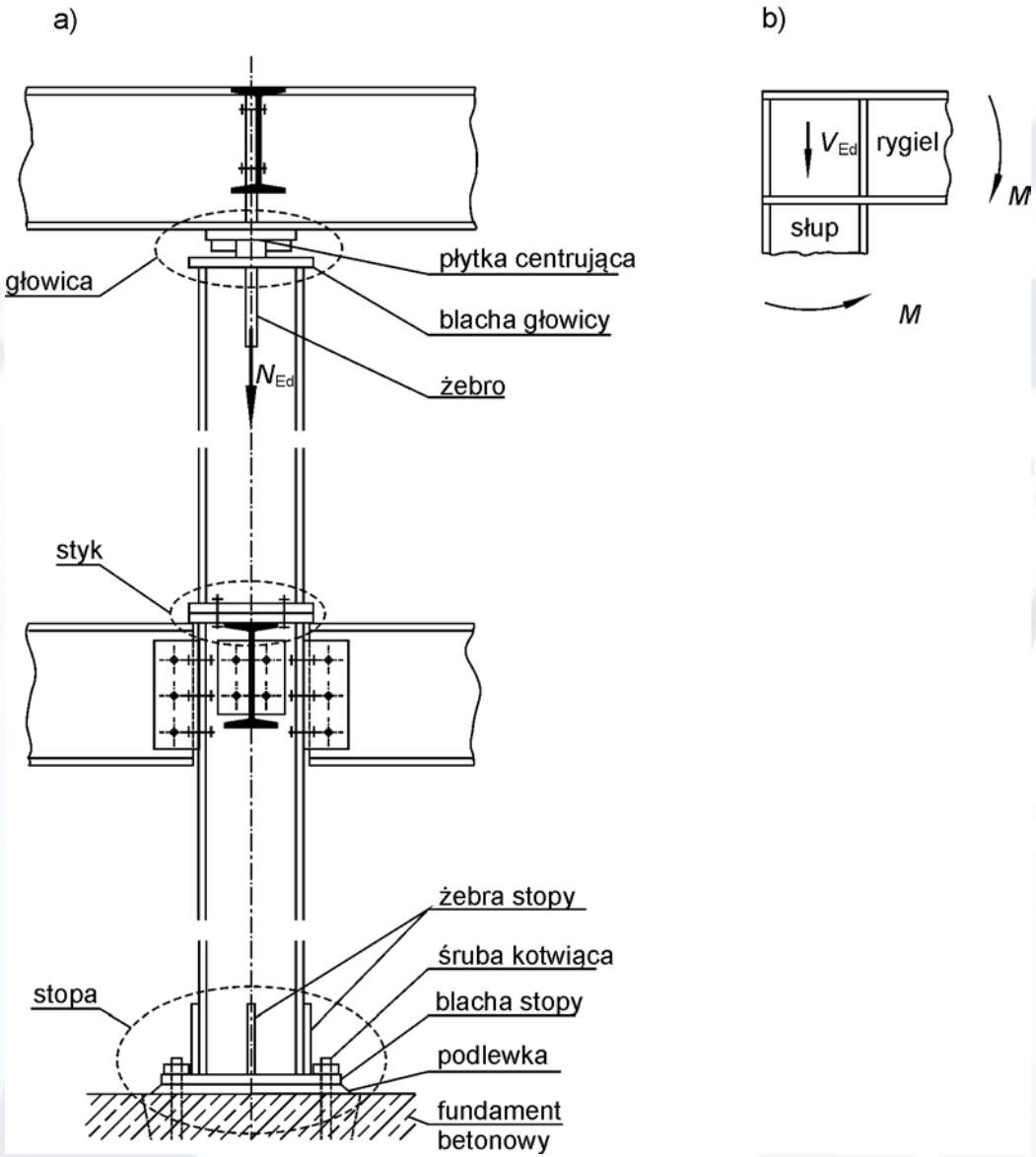
Rys. 6.22. Tężniki pionowe podłużne wiązarów

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

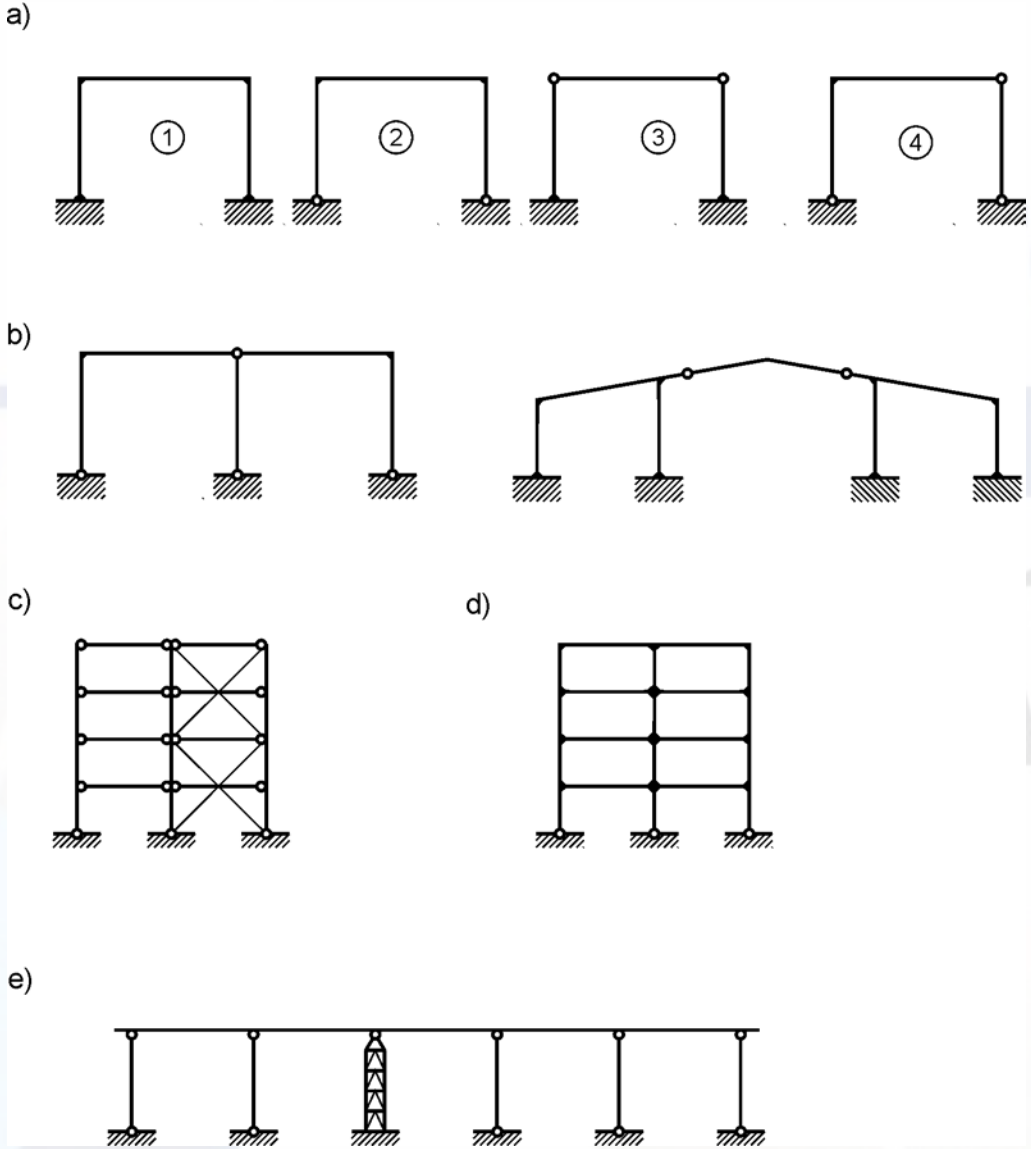
Główne zadania tężników pionowych podłużnych:

- zapewnienie stateczności wiązarów dachowych zarówno w czasie montażu jak też w okresie eksploatacji,
- zabezpieczenie wiązarów dachowych przed skręcaniem się, nachyleniem lub wywróceniem,
- zmniejszenie długości wyboczeniowych pasów górnych wiązarów dachowych,
- stężenia pionowe w linii słupków skrajnych wiązarów tworzące ciągłą kratownicę o pasach równoległych (np. rys 6.23a, b, c, d) mogą wpływać (w zależności od podatności węzłów) na zmniejszenie długości wyboczeniowych słupów głównych podpierających wiązary dachowe, w kierunku podłużnym (osi y).

7. SŁUPY STALOWE



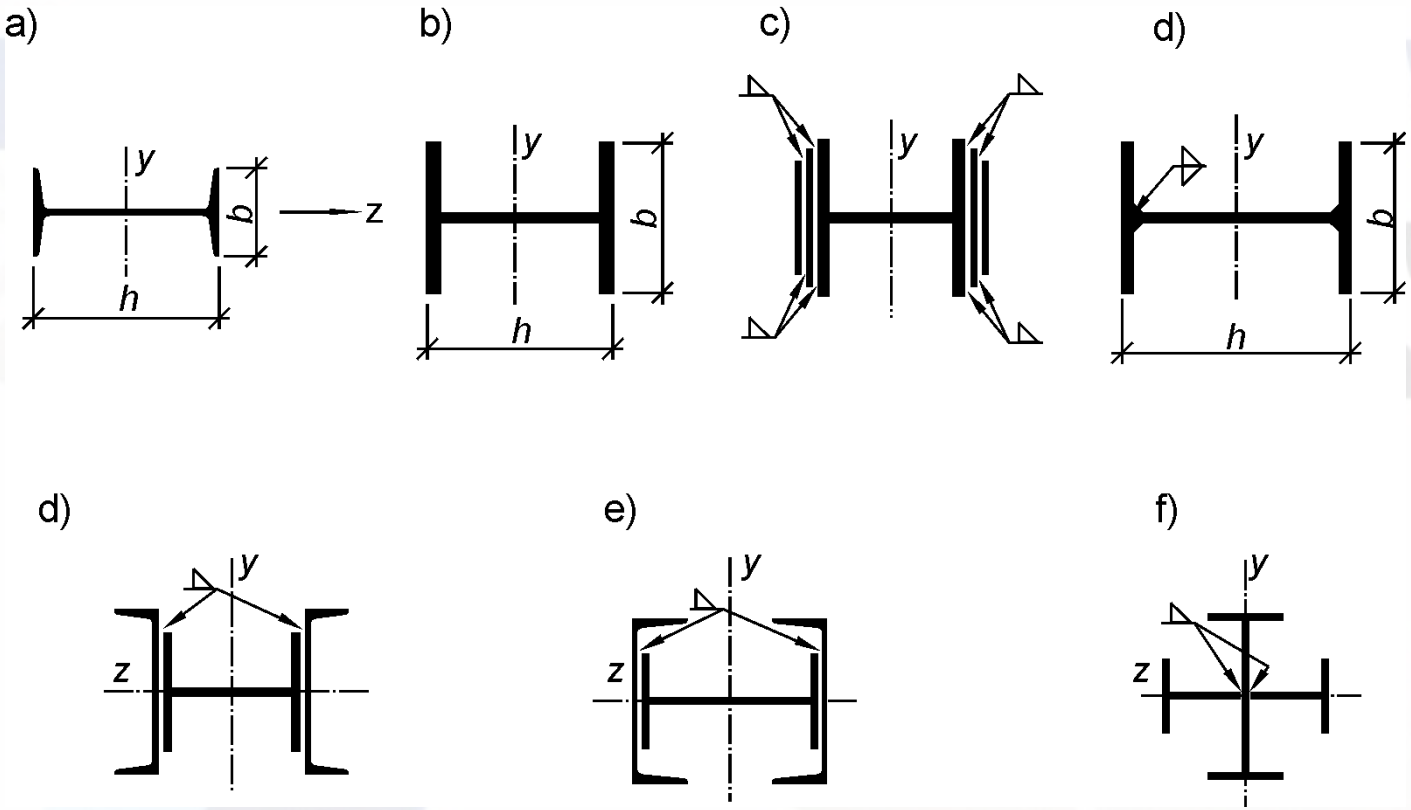
Rys. 7.1. Konstrukcja słupa: a) z głowicą, b) z narożem



Rys. 7.2. Schematy statyczne słupów w ustrojach nośnych: a) układy poprzeczne słupowo – ryglowe hal, b) ramy wielonawowe hal, c) układy ryglowo – słupowe szkieletów budynków wielonawowych i wielokondygnacyjnych, d) ramy szkieletów stalowych, e) estakady

7.2. Przekroje poprzeczne trzonów słupów

Przekroje poprzeczne trzonów słupów należy dobierać w sposób racjonalny tak, aby smukłość λ_i w kierunku y i z (rys. 7.3) w przybliżeniu miały podobne wartości.

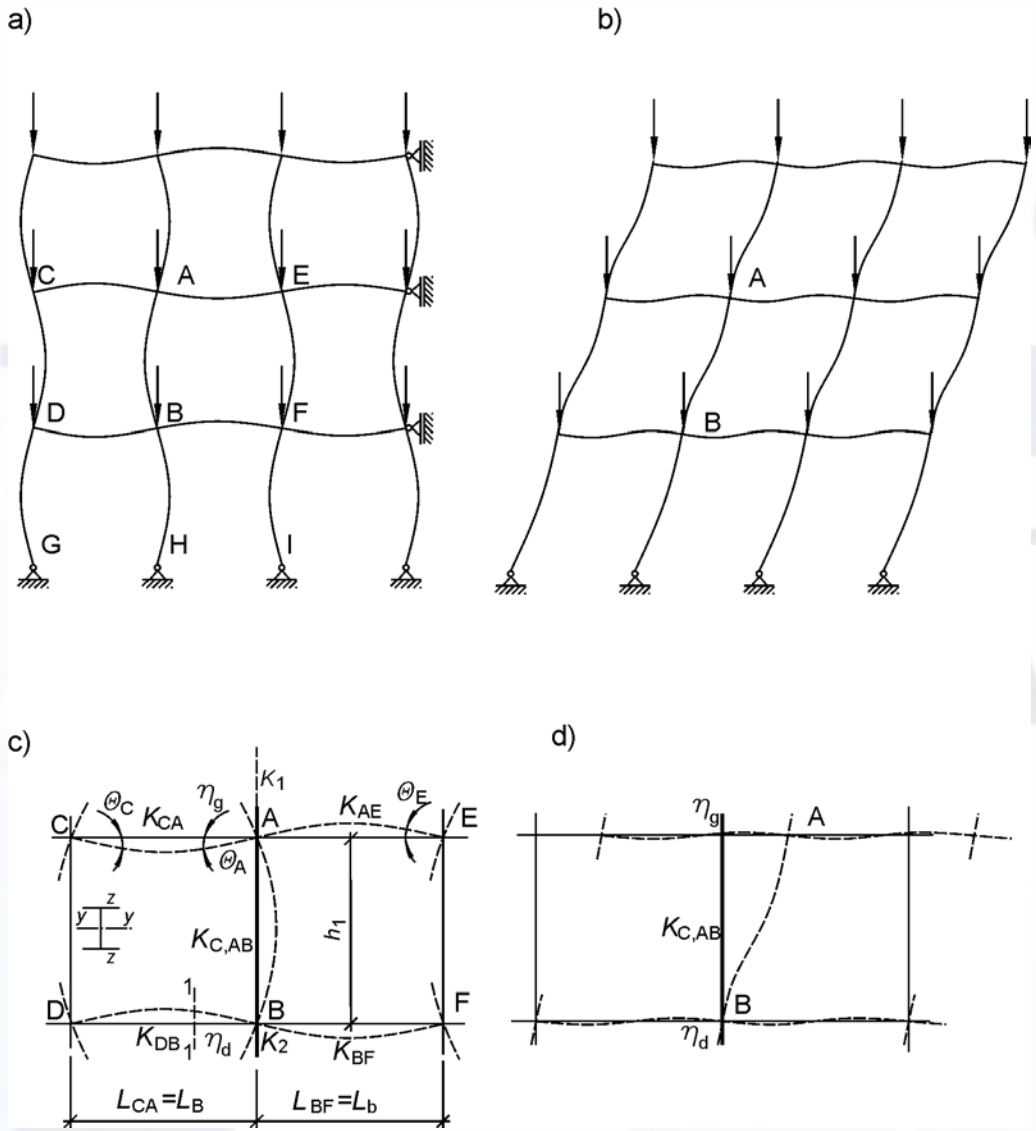


Rys. 7.3. Przekroje poprzeczne bisymetryczne, otwarte słupów

7.3.1. Długości wyboczeniowe słupów w płaszczyźnie ramy lub ramownicy

Długości wyboczeniowe układów słupowo – ryglowych, wielokondygnacyjnych i wielonawowych zależą od kilku parametrów, a mianowicie od:

- układu geometrycznego szkieletu (wysokości kondygnacji, rozpiętości rygli),
- sztywności przekrojów poprzecznych słupów na poszczególnych kondygnacjach i sztywności rygli łączących się ze słupami,
- rodzaju węzłów łączących rygle ramy szkieletowej ze słupami (przegubowe lub sztywne),



Rys. 7.7. Krzywe wyboczenia się słupów ram: a) szkielet nieprzesuwny, b) szkielet przesuwny, c) model słupa nieprzesuwnego, d) model słupa przesuwnego

Zgodnie z aneksem E normy PN–EN 1993–1–1, podatności węzłów modeli pokazanych na rys. 7.7 można określić wg wzorów:

- węzeł górny

$$\eta_g = \frac{K_{C,AB} + K_1}{K_{C,AB} + K_1 + K_{CA} + K_{AE}}, \tag{7.1a}$$

- węzeł dolny

$$\eta_d = \frac{K_{C,AB} + K_2}{K_{C,AB} + K_2 + K_{DB} + K_{BF}}, \tag{7.1b}$$

gdzie:

$K_{C,AB} = I_c / h_1$ – sztywność względna segmentu słupa AB,

$K_1,\ K_2$ – sztywność względna słupów wyższej i niższej kondygnacji,

$K_{CA},\ K_{AE},\ K_{DB},\ K_{BF} = K_{ij}$ – sztywności względne rygli (belek, podciągów).

Sztywności względne rygli ram K_{ij} obliczać można wg wzorów:

$$K_{ij} = \alpha_i \frac{I_b}{L_b} \gamma_i, \tag{7.2}$$

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz. 1 Belki, belkowary kratownicowe, słupy, ramownice

Podatność węzłów η_i słupa kondygnacji parteru BH, zgodnie z modelem jak na rys 7.7,

można obliczać wg wzorów:

$$\eta_g = \frac{K_{C,BH} + K_{C,AB}}{K_{C,BH} + K_{C,AB} + K_{DB} + K_{BF}}. \qquad (7.3)$$

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Słup parterowej hali jednonawowej

Podatność węzła górnego η_g ramy parterowej jednonawowej obliczyć można przyjmując:

$K_{C,AB} = K_{B,F} = 0$, $K_{C,BH} = K_C$, $K_{DB} = K_{11}$.

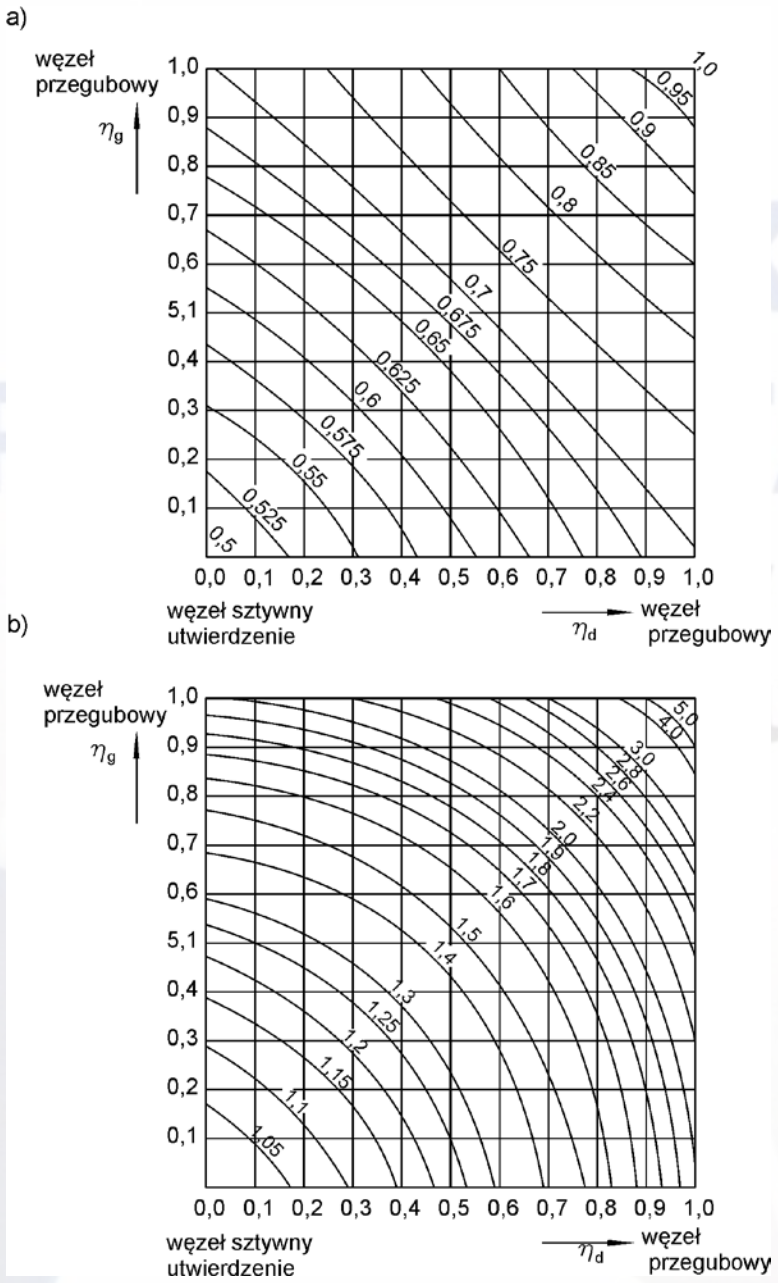
Wtedy wzór (7.3a) można zapisać w postaci:

$$\eta_g = \frac{K_C}{K_C + K_{11}}. \qquad (7.4a)$$

Podatność węzła dolnego słupa η_d zależy od sposobu połączenia stopy słupa

z fundamentem betonowym. Najczęściej stopy słupa modeluje się jako:

– przegubowe: $\eta_d = 1{,}0$,



Rys. 7.8. Współczynniki długości wyboczeniowych η: a) słupy ram nieprzesuwnych (nieprzechyłowych), b) słupy ram przesuwnych (przechyłowych)

Jan Żmuda
KONSTR TOWANIE
ALOWYCH
kratownicowe,
upy, ramownice

7.5. Słupy o przekrojach pełnościennych obciążonych siłami osiowymi i momentami zginającymi

Słupy obciążone siłami osiowymi i momentami zginającymi są najczęściej elementami konstrukcyjnymi ram parterowych lub wielokondygnacyjnych, czyli szkieletami stalowymi budynków. Postanowienia normy PN–EN 1993–1–1 zalecają, aby nośności i stateczności takich słupów obliczać z uwzględnieniem imperfekcji lokalnych i globalnych ram z zastosowaniem analizy I i II rzędu. Wiele ram stalowych ma jednak niewielką wrażliwość na efekty II rzędu, a wtedy nośność słupów można obliczać jako elementów wyizolowanych, dla których długości wyboczeniowe określa się wg zasad podanych w podrozdziale 4.3, a nośności według postanowień normy PN–EN 1993–1–1, czyli wg wzorów interakcyjnych:

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy}\frac{M_{y,Ed}+\Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz}\frac{M_{z,ED}+\Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \le 1, \qquad (7.8)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy}\frac{M_{y,Ed}+\Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz}\frac{M_{z,ED}+\Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \le 1, \qquad (7.9)$$

gdzie:

N_{Ed}, $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ – obliczeniowe wartości siły podłużnej i maksymalnych momentów zginających względem osi y i z,

$\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$ – ewentualne momenty spowodowane przesunięciem środka ciężkości przekroju współpracującego klasy 4, wyznaczane zgodnie z pkt 6.2.9.3 normy PN–EN 1993–1–1,

N_{Rk}, $M_{y,Rk}$, $M_{z,Rk}$ – wartości nośności przekroju zależne od klasy ścianek:

kl. 1, 2: $N_{Rk} = A\, f_y$, $M_{y,Rk} = W_{y,pl}\, f_y$, $M_{z,Rk} = W_{z,pl}\, f_y$

kl. 3: $N_{Rk} = A\, f_y$, $M_{y,Rk} = W_{y,el}\, f_y$, $M_{z,Rk} = W_{z,el}\, f_y$

kl. 4: $N_{Rk} = A_{eff}\, f_y$, $M_{y,Rk} = W_{y,eff}\, f_y$, $M_{z,Rk} = W_{z,eff}\, f_y$

$W_{y,pl}$, $W_{z,pl}$ – wskaźniki wytrzymałości plastyczne zależne od kształtu przekroju poprzecznego. Dla przekroju dwuteowego można przyjąć:

$W_{y,pl} = 1{,}14\, W_{y,el}$, $W_{z,pl} = 1{,}25\, W_{z,el}$ lub $1{,}5\, W_{z,el}$,

A_{eff} – pole przekroju efektywnego (rozdz. 4),

$W_{y,eff}$, $W_{z,eff}$ – wskaźniki przekrojów efektywnych których zasady obliczania podano w normie PN–EN 1993–1–5 i omówiono w podrozdziale 9.12, cz. II.

Ponadto:

χ_{LT} – współczynnik zwichrzenia,

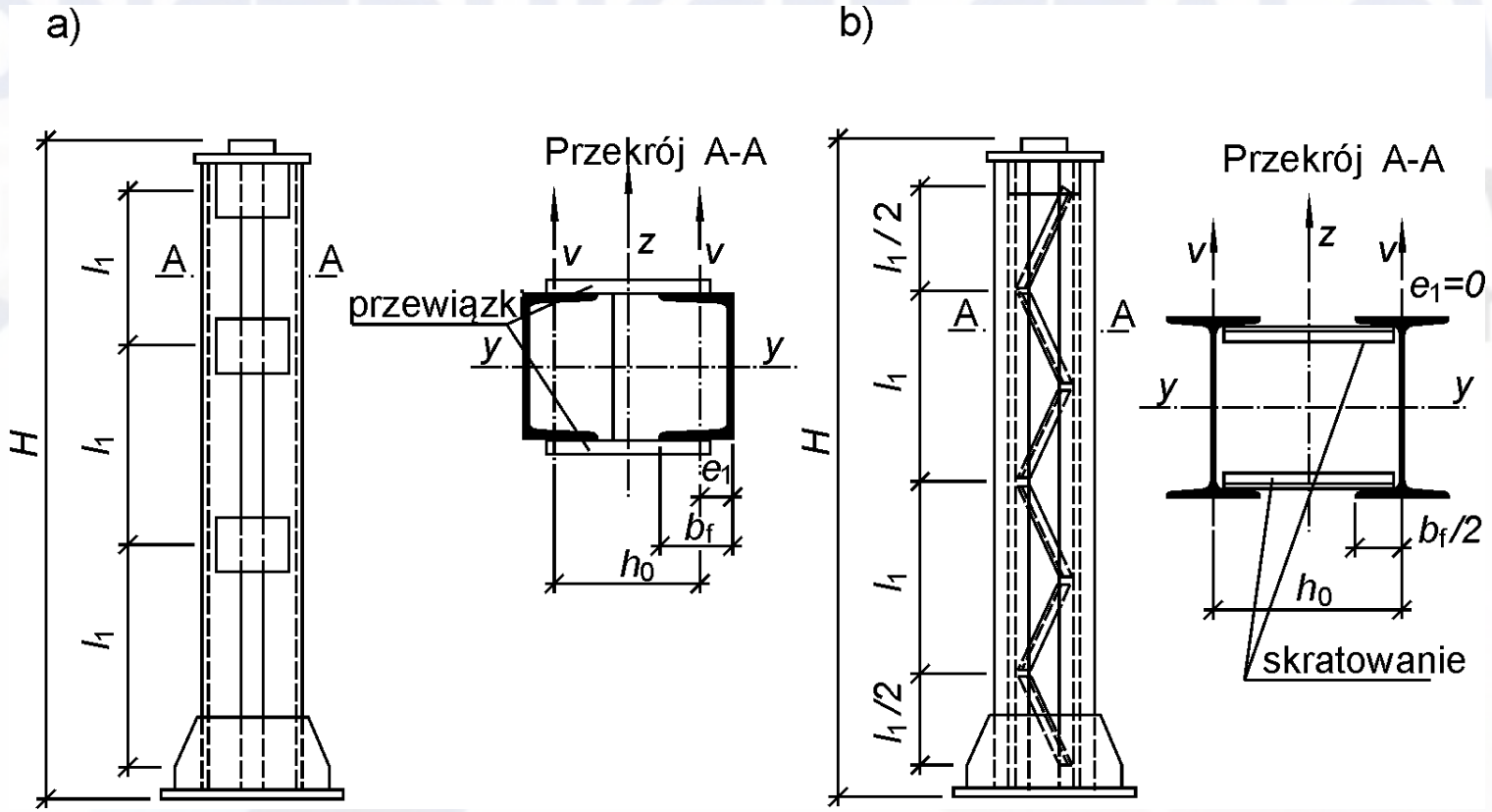
χ_y, χ_z - współczynniki wyboczenia, wg wzorów (4.4),

k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz} – współczynniki interakcji, wyznaczone zgodnie z załącznikami A i B normy PN–EN 1993–1–1.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

7.6. Słupy złożone, wielogałęziowe

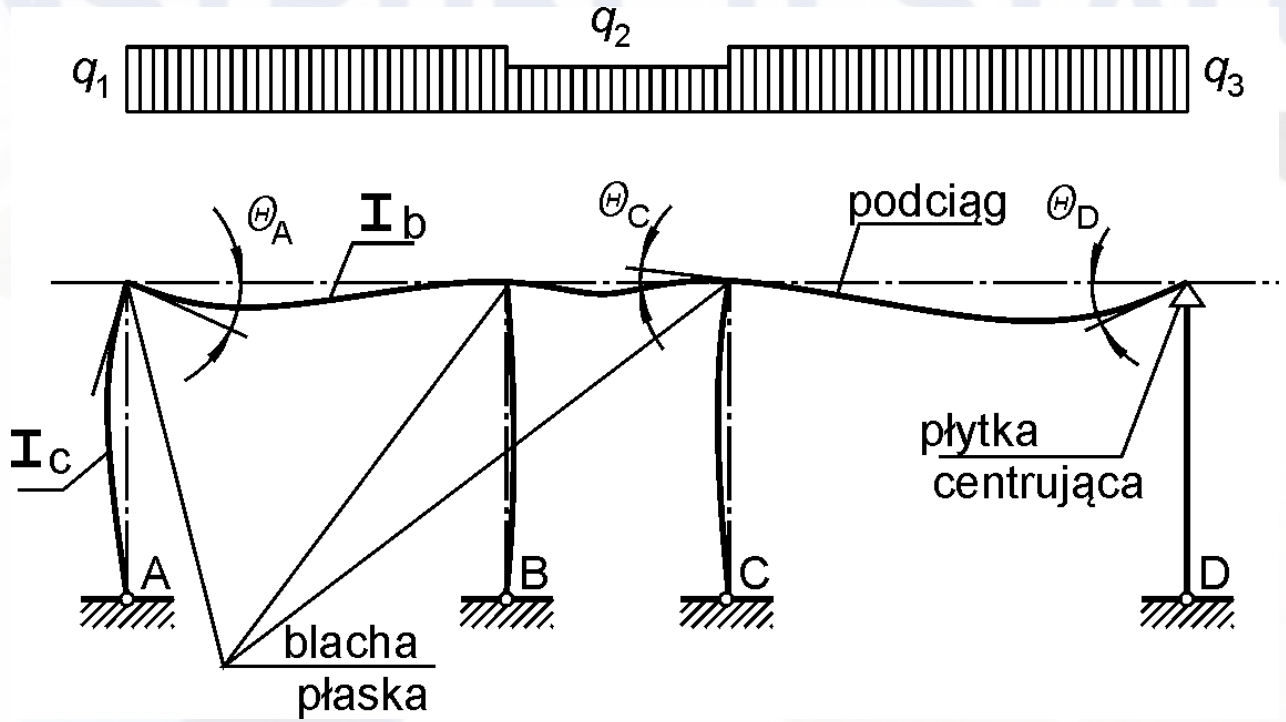
Słupami złożonymi nazywa się elementy ściskane osiowo lub ściskane i zginane, składające się z dwóch lub więcej gałęzi połączonych przewiązkami (rys. 7.9a) lub skratowaniem (rys. 7.9b), podpierające konstrukcje wyżej położone lub samonośne (maszty).Z uwagi na duże koszty słupy złożone rzadko projektuje się na szkielety wielokondygnacyjne.



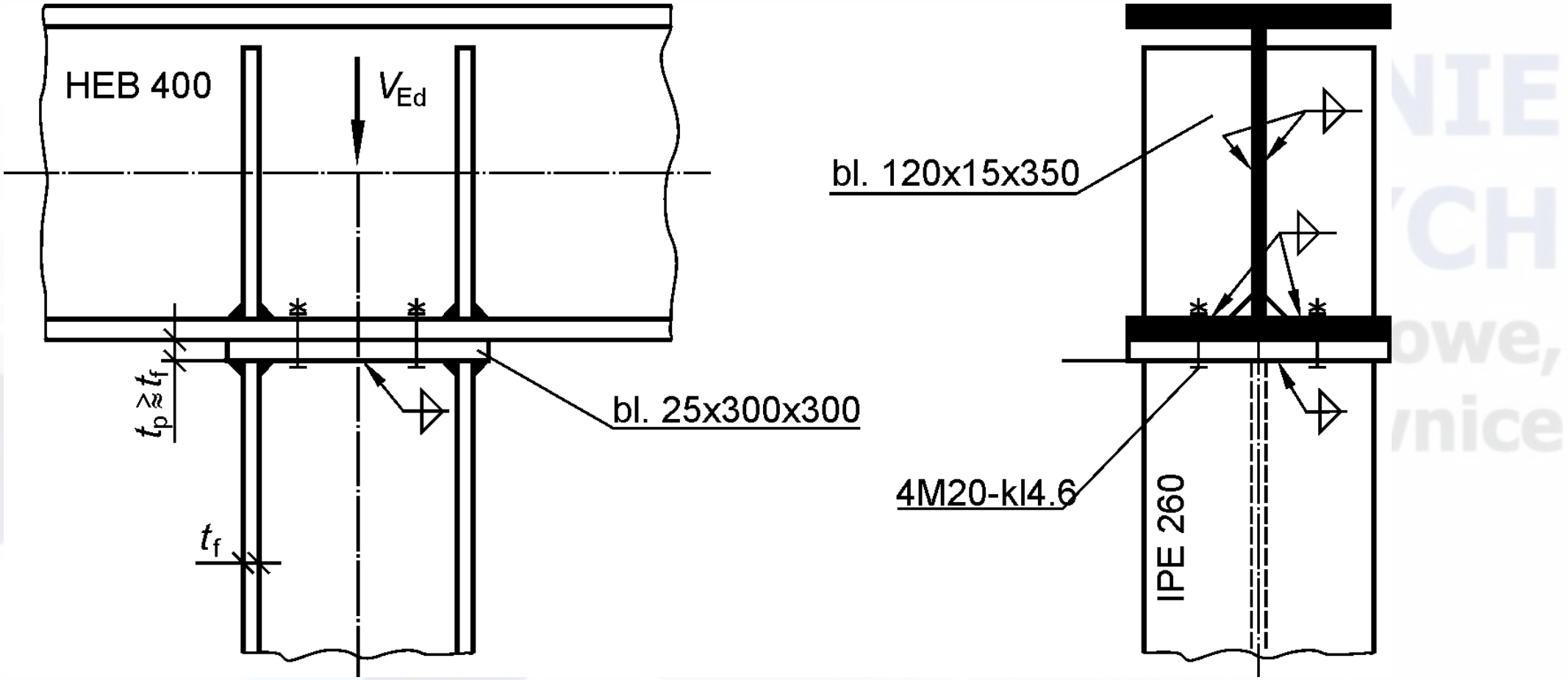
Rys. 7.9. Słupy złożone: a) przewiązkowy, b) skratowany

7.8. Głowice słupów

Konstrukcja głowicy zależy od kształtu przekroju poprzecznego słupa (pełnościenny złożony), rodzaju konstrukcji, bezpośredniego oparcia rygla (płaska pozioma blacha, płytka centrująca płaska lub styczna) i elementów złącznych (śruby, spoiny) oraz żeber i przepon usztywniających. Dobór elementu konstrukcyjnego bezpośredniego oparcia (blachy poziomej, płytki centrującej) zależy od sztywności rygla (belki stropowej, wiązara dachowego) i słupa.



Rys. 7.13. Dobór podparć kontaktowych słupów z podciągiem



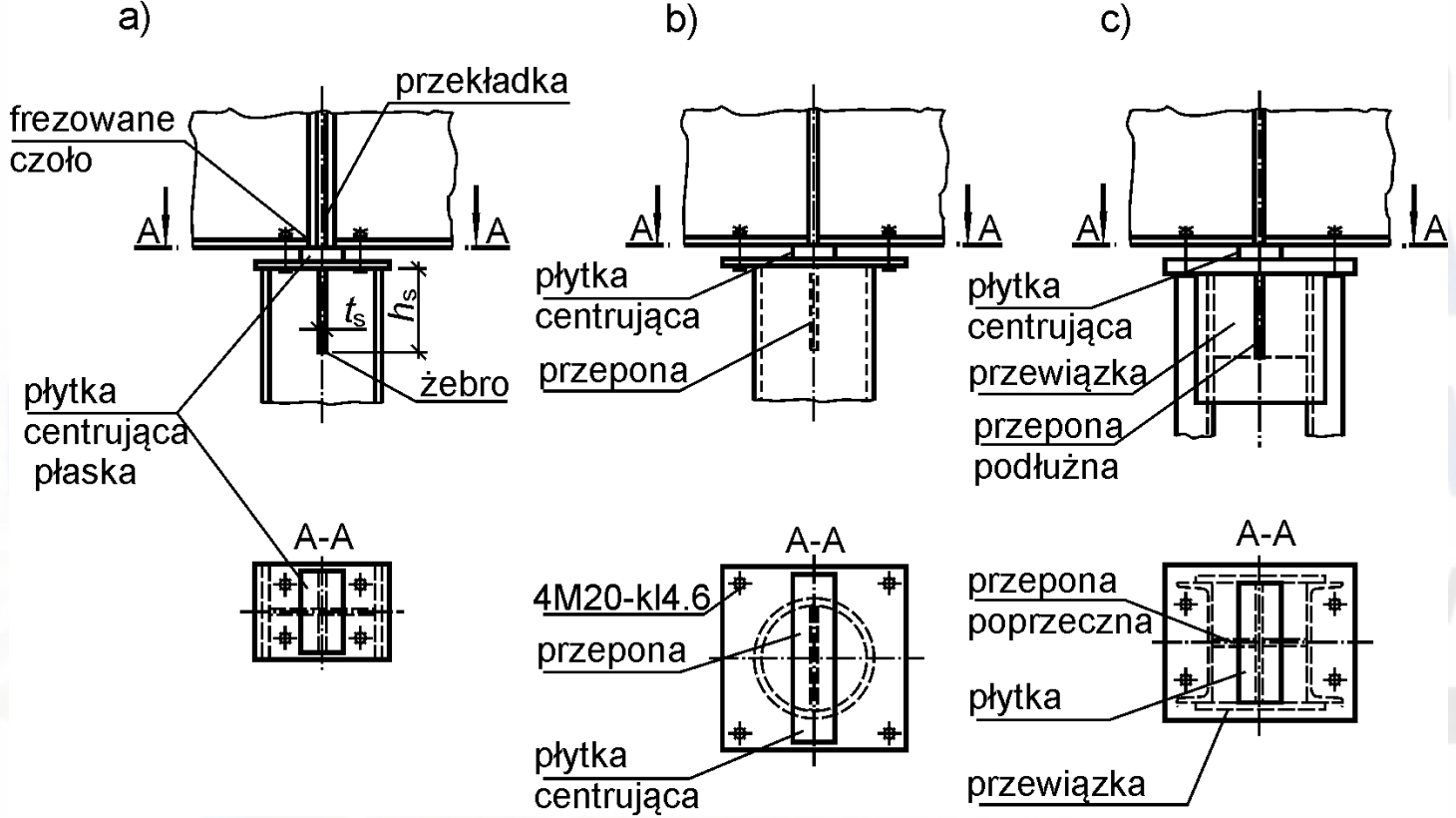
Rys. 7.14. Blacha pozioma głowicy słupa w połączeniu z podciągiem

7.8.3. Głowica z płaską płytką centrującą

Jeśli relacje sztywności rygla (belki dźwigara) są w granicach:

$$10 \le I_b / I_c < 20\,, \tag{7.10}$$

to bezpośrednim oparciem rygla może być płytka płaska centrująca usytuowana prostopadle do podłużnej osi rygla. Przykłady konstrukcji głowic z płaską płytką centrującą pokazano na rys. 7.15.



Rys. 7.15. Rozwiązania konstrukcyjne głowicy słupa: a) trzon dwuteowy, b) trzon z rury, c) trzon złożony przewiązkowy

Żebra pionowe (rys. 7.15a) lub przepony usztywniające (rys. 7.15b, c) wzmacniają blachę poziomą zamykającą czoło trzonu słupa. Głowica słupa z płytki centrującej przekazuje na trzon słupa tylko siły ściskające i jako węzeł przegubowy tworzy czytelny układ statyczny pomiędzy górnym końcem słupa i podpieranym ryglem.

7.8.4. Głowica z styczną płytką centrującą

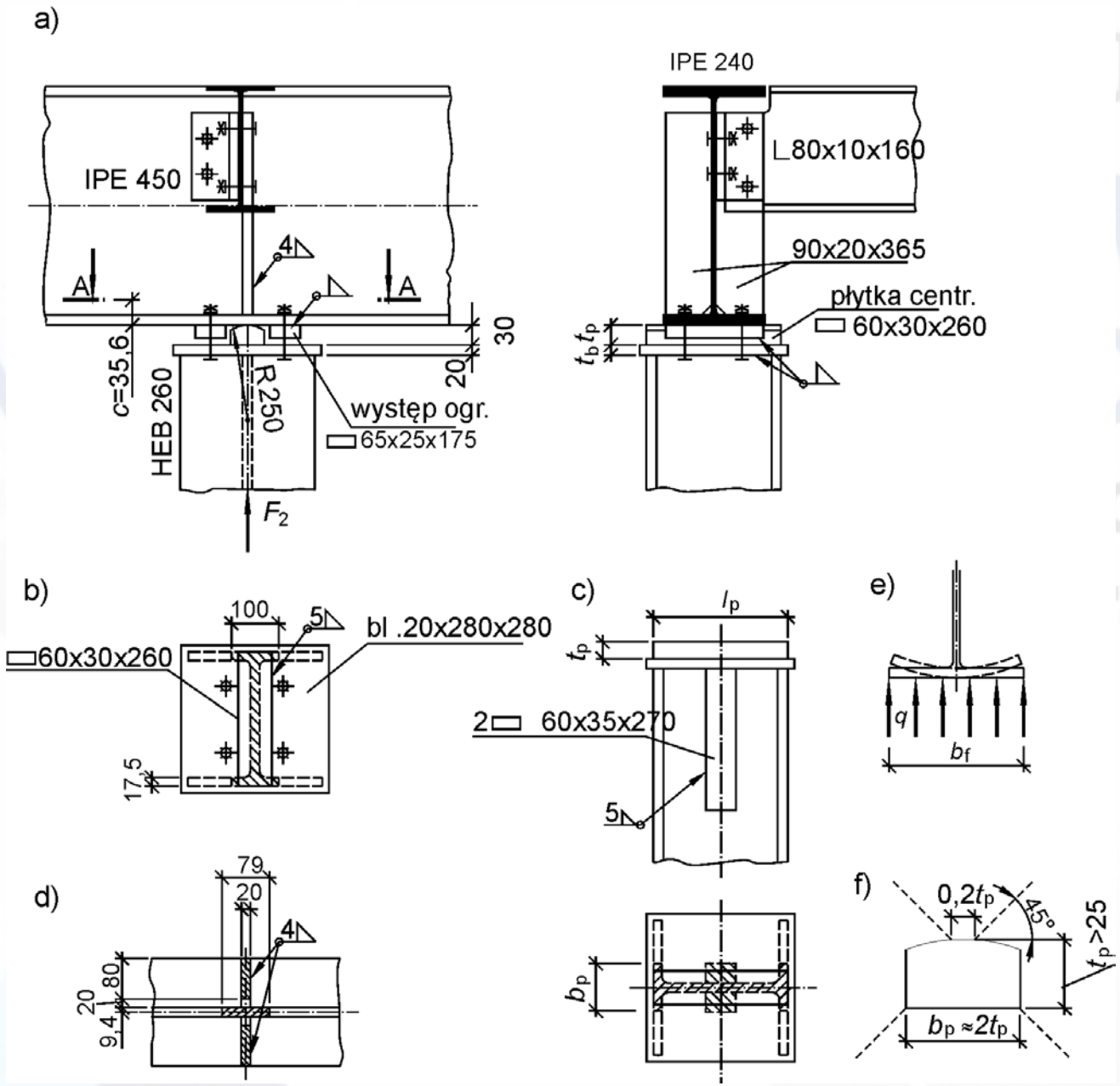
Jeśli stosunek sztywności rygla i słupa

$$I_b / I_c < 10, \qquad (7.11)$$

i rygiel podpierany jest dużej rozpiętości, to ze względu na duży kąt ugięcia θ (rys. 7.13), płytki centrujące płaskie nie zapewniają równomiernego nacisku na trzon słupa, a wtedy stosuje się płytkę z profilowaną górną powierzchnią nazywaną płytką styczną (rys. 7.16f). Przykład rozwiązania konstrukcyjnego głowicy słupa z płytką styczną pokazano na rys. 7.16a.

Płytka styczna, poprzez kontakt liniowy pod kątem do 45° przekazuje obciążenie równomierne od podpieranego rygla na blachę poziomą i trzon słupa. Ponieważ powierzchnia kontaktu blachy poziomej i środnika słupa jest niewielka, zaleca się projektowanie elementów wzmacniających (np. rys. 7.16c). Dopasowane do pasów dolnych rygla (dźwigara) żebra poprzeczne podporowe (rys. 7.16d) uniemożliwiają odkształcenie się pasów (rys. 7.16e).

Jan Żmuda PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



Rys. 7.16. Głowica słupa dwuteowego ze styczną płytką centrującą

7.9. Styki słupów

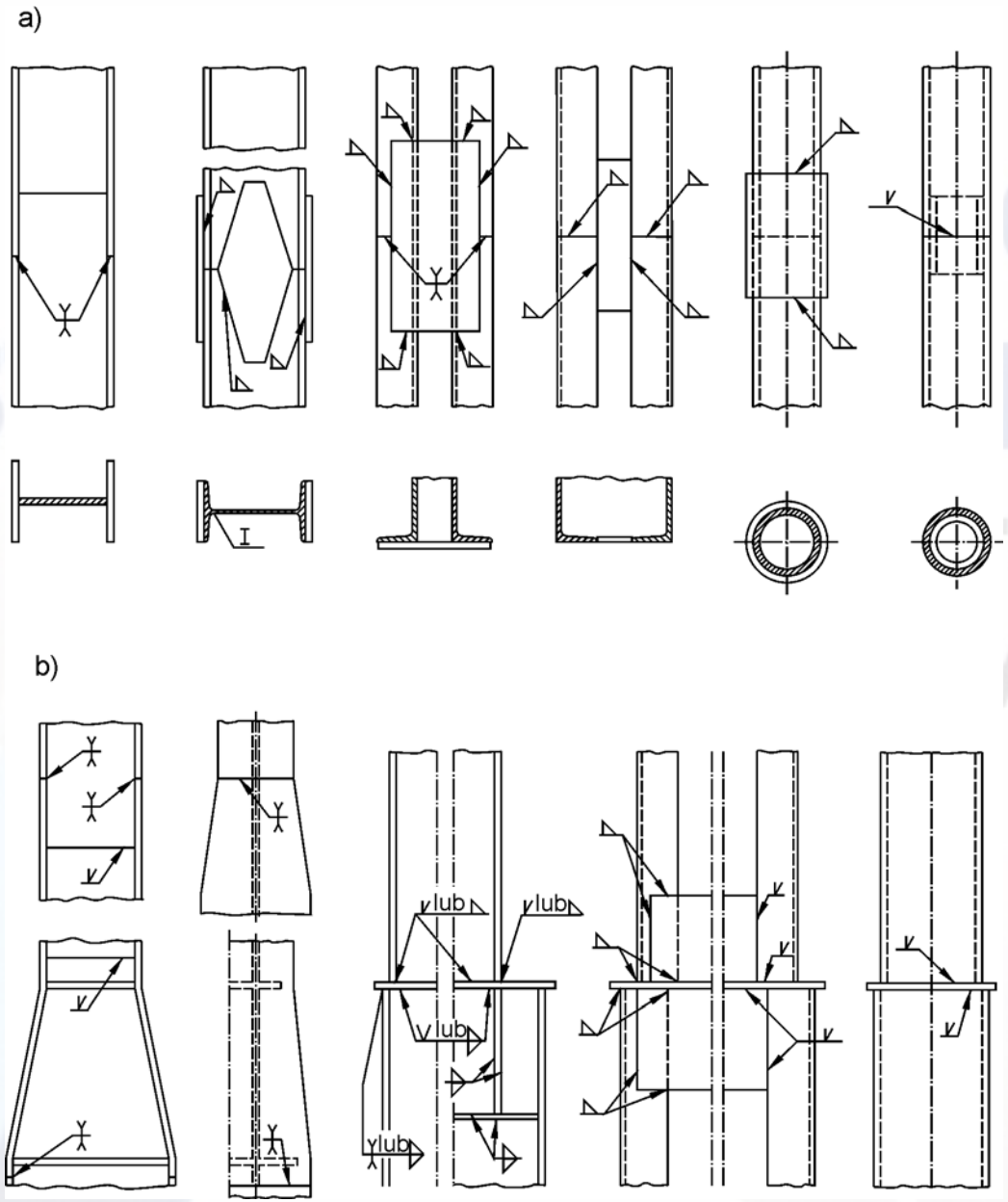
7.9.1. Zasady konstruowania

Projektuje się styki warsztatowe i montażowe. Warsztatowe wykonuje się ze względów technologicznych i konstrukcyjnych. Wykonywany w wytwórni konstrukcji stalowej (warsztacie) element wysyłkowy składa się z wyrobów hutniczych o różnych wymiarach i kształtach. Połączenie tych wyrobów, nawet o tych samych przekrojach poprzecznych lecz różnych długościach, wymaga wykonania w warsztacie styku z uwzględnieniem odpowiedniej technologii. Styki warsztatowo - technologiczne w przekrojach poprzecznych wykonuje się ze wzmocnieniem – nakładki rys. (7.18a) lub przy właściwej technologii spawania – bez nakładek.

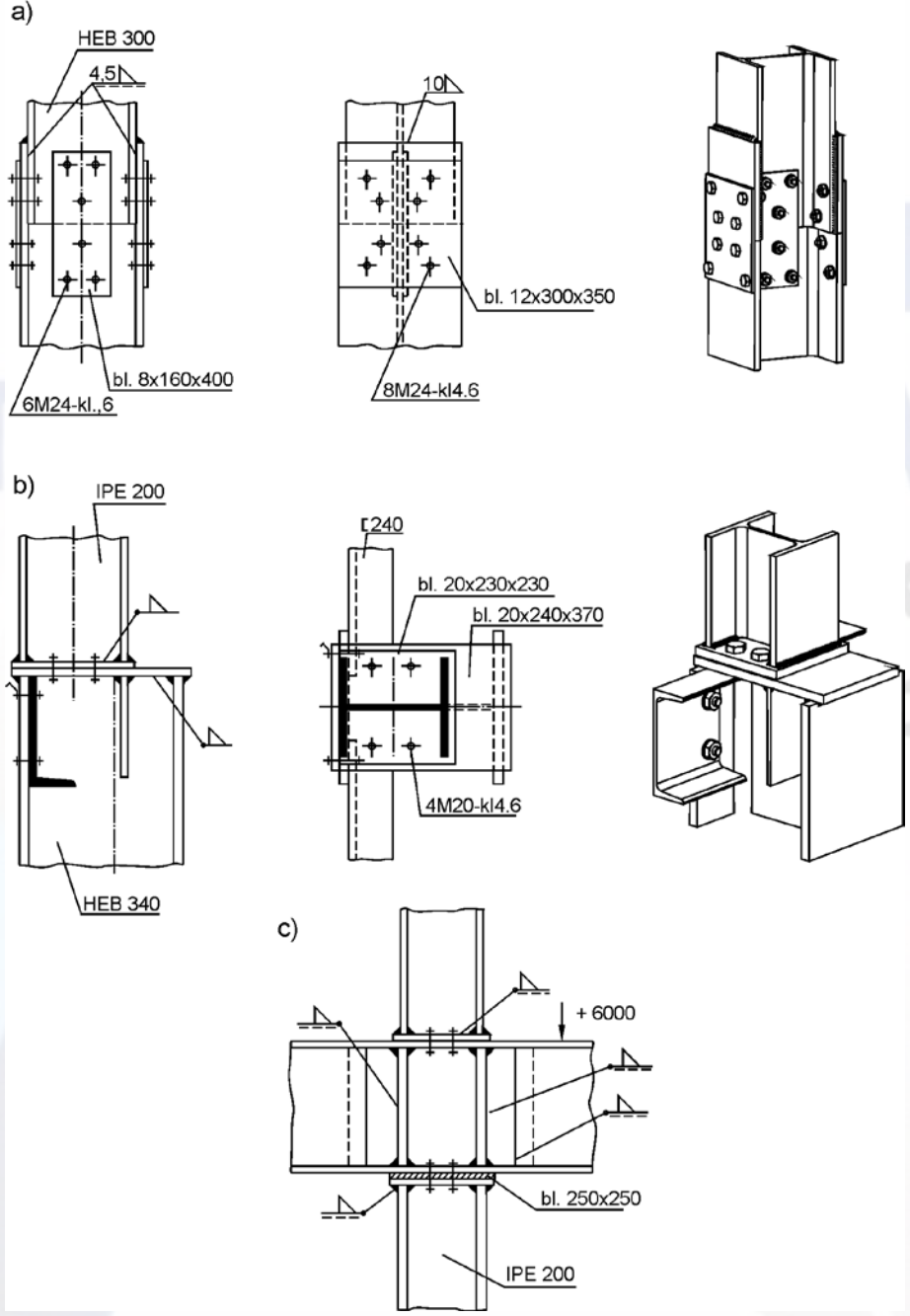
Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

Styki warsztatowe konstrukcyjne są wymagane przy wykonaniu trzona słupa ze zmianami przekroju poprzecznego na długości. Jeśli przekroje poprzeczne trzonów różnią się, to styki wykonuje się za pomocą poziomej blachy przyspawanej obustronnie do czoła kształtowników (rys. 7.18b) o większym i mniejszym przekroju poprzecznym. Spoiny styku czoła trzonu i blachy czołowej oraz powierzchnia kontaktu przekrojów poprzecznych sprawdzane są z warunku nośności na docisk miejscowy, przy czym spoiny można obliczać od obciążenia zredukowanego $0{,}25\ N_{Ed}$. Jeśli warunek docisku (np. wz. 7.14) nie jest spełniony, to wzmacnia się słabsze ścianki żebrami (rys. 7.18b). Styki warsztatowe wykonuje się najczęściej za pomocą spoin.

Styki montażowe wykonuje się na budowie, scalając elementy wysyłkowe w złożony ustrój konstrukcyjny. Przykład styków montażowych pokazano na rys. 7.19.



Rys. 7.18. Styki słupów warsztatowych; a) technologiczne, b) konstrukcyjne



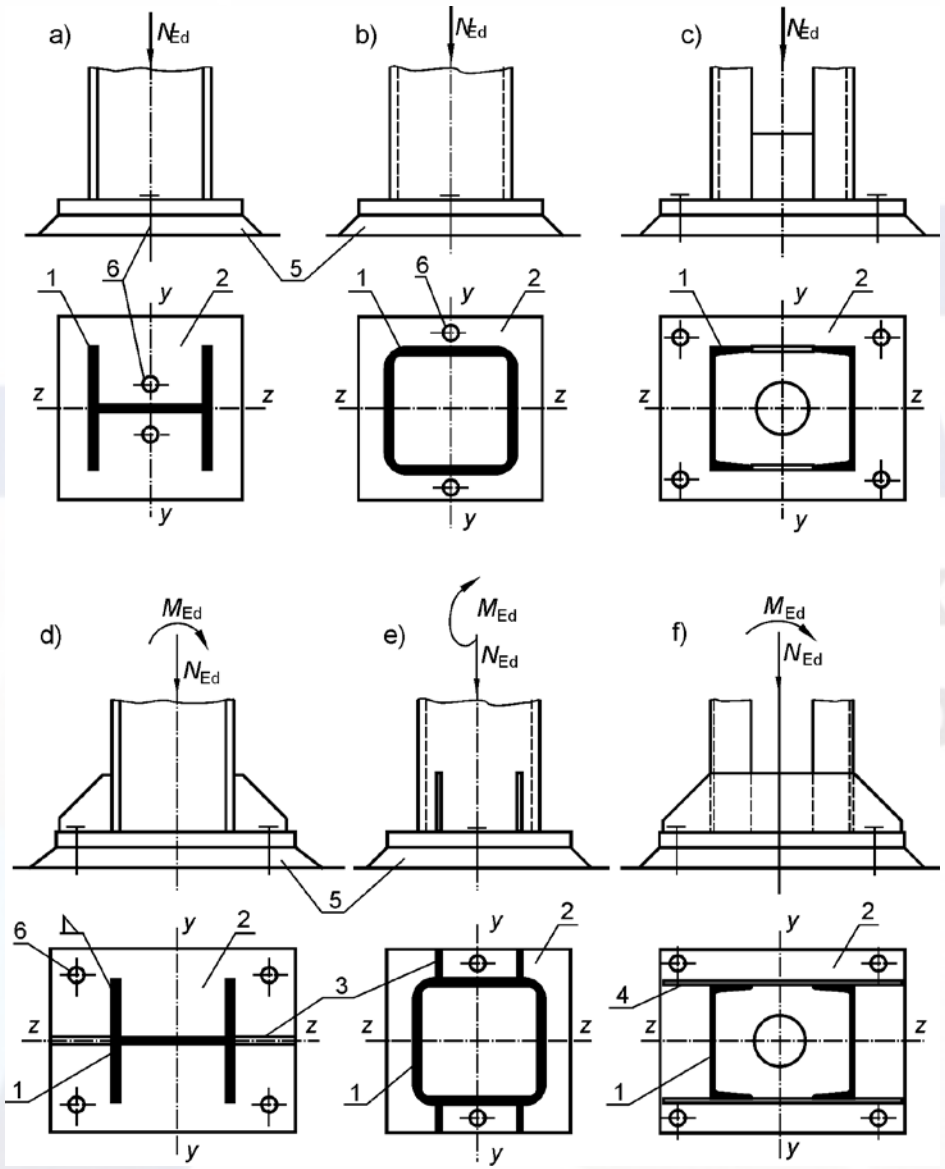
Rys. 7.19. Rozwiązanie konstrukcyjne styków montażowych

7.10. Stopy stalowe słupów

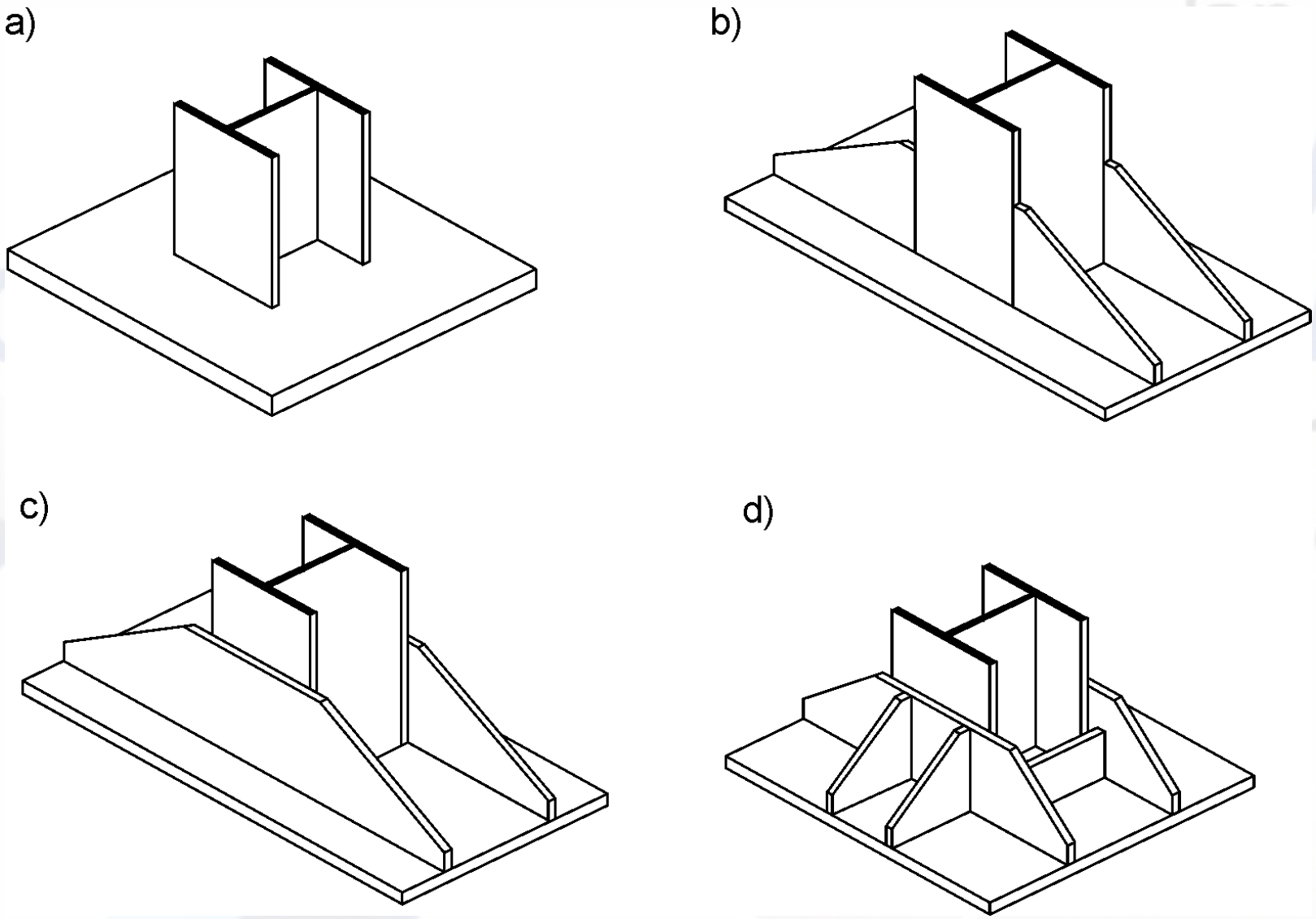
7.10.1. Konstrukcje stóp

Stopą słupa stalowego nazywa się dolny koniec trzona zakończony czołowo blachą poziomą, przekazującą obciążenie na fundament betonowy.

Konstrukcja i kształt stopy zależy od przekroju poprzecznego trzonu, schematu statycznego, rodzaju i wartości przekazywanych obciążeń i sposobu zakotwienia w fundamencie betonowym. Głównym elementem konstrukcyjnym stopy każdego słupa jest blacha pozioma zamykająca czołowo trzon słupa i zwiększająca powierzchnie docisku do betonu. Blacha pozioma (2) (rys. 7.20) wraz z żebrami (3) i blachami trapezowymi (4) powinna zapewnić równomierny docisk do fundamentu betonowego. Stosując grube blachy poziome ogranicza się ugięcie blachy poziomej pod naprężeniami odporowymi fundamentu betonowego, co jednak ekonomicznie nie zawsze jest uzasadnione.



Rys. 7.20. Stopy stalowe słupów: a), b), c) z obciążeniem osiowym, d), e), f) z obciążeniem osiowym i momentem zginającym; 1 – trzon słupa, 2 – blacha pozioma, 3 – żebra pionowe, 4 – blachy trapezowe, 5 – podlewka, 6 – śruby kotwiące



Rys. 7.21. Rozwiązania konstrukcyjne stóp słupów pełnościennych

7.10.2. Wytrzymałość obliczeniowa na docisk miejscowy betonu

Wytrzymałość obliczeniowa na docisk betonu pod stopą stalową słupa wg postanowień normy PN–EN 1992–1–1 obliczyć należy wg wzoru:

$$f_{jd} = \alpha \, \beta_j \, f_{cd} \,, \tag{7.19}$$

gdzie:

f_{cd} – wytrzymałość obliczeniowa na ściskanie betonu, zależna od klasy betonu,

β_j – współczynnik materiałowy, którego wartość można przyjąć równą 2/3 pod warunkiem, że wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie podlewki jest nie mniejsza niż 1/5 charakterystycznej wytrzymałości betonu, a grubość podlewki jest nie większa niż 0,2 najmniejszej szerokości blachy poziomej stopy stalowej,

$$\alpha = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} = \sqrt{\frac{a_r \, b_r}{a_p \, b_p}} \,. \tag{7.20}$$

Dla stopy kwadratowej (rys. 7.22) powierzchnia rozdziału

$$a_r = b_r = \min\begin{cases} a + 2\,a_1 \\ 5\,a \\ a + h_f \end{cases}, \qquad (7.21)$$

gdzie:

A_{c1}, a_r, b_r – powierzchnia rozdziału docisku blachy do fundamentu,

$A_{c0} = a\,b$ – powierzchnia stalowej płyty poziomej stopy słupa.

Wytrzymałość obliczeniową betonu oblicza się wg wzoru

$$f_{cd} = a_{cc}\ f_{ck} / \gamma_c\,, \qquad (7.22)$$

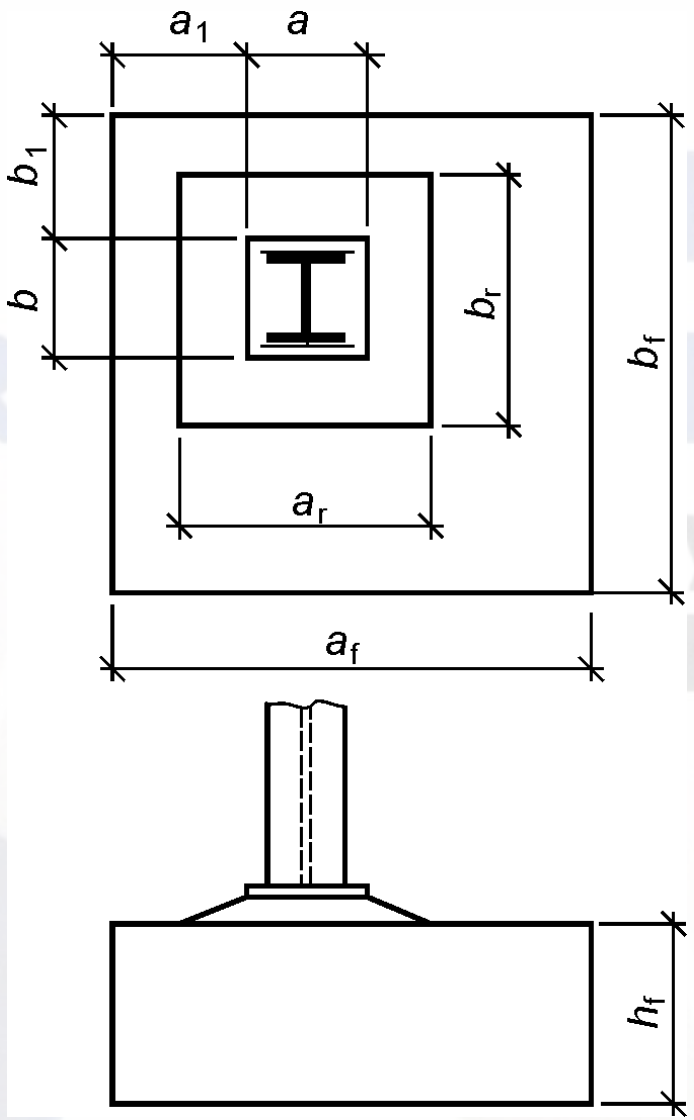
gdzie:

f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie,

a_{cc} – współczynnik,

γ_c – współczynnik obciążenia dla betonu.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



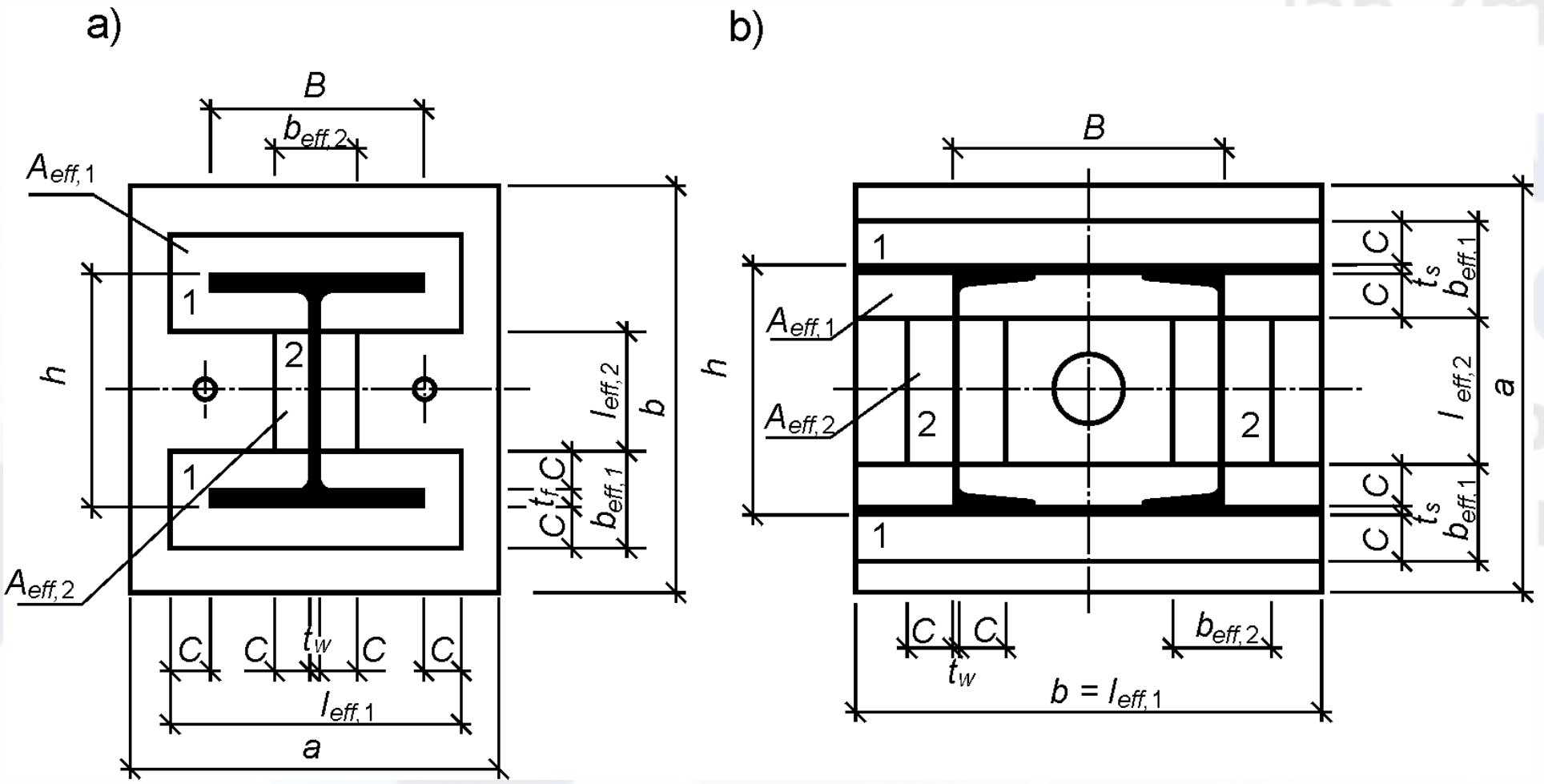
Rys. 7.22. Fundament stalowej stopy słupa

7.10.3. Ogólne zasady obliczenia nośności elementów konstrukcyjnych stóp stalowych słupów

Nośność stóp stalowych zależy od wielu parametrów, przy czym najistotniejsze z nich są następujące:

- wytrzymałość na docisk miejscowy betonu fundamentu na którym posadowiono słup stalowy,
- sposób obciążenia trzona i stopy słupa; siła ściskająca osiowa lub moment zginający w jednej bądź obu płaszczyznach przekrojów poprzecznych wraz z siłą ściskającą,
- kształt i wielkość przekroju poprzecznego trzona słupa,
- projektowany schemat statyczny stopy słupa: przegubowa lub sztywna, a w następstwie rozmieszczenie śrub fundamentowych kotwiących blachę poziomą,
- układ żeber pionowych, blach trapezowych usztywniających blachę poziomą stopy.

Nośność blachy poziomej od odporu fundamentu betonowego i podlewki wyznacza się, wg. postanowień normy PN–EN 1993–1–8, z sumy nośności $F_{c,Rd,i}$ zastępczych króćców teowych wydzielonych ze strefy ściskania (rys. 7.23).



Rys. 7.23. Efektywne pola króćców teowych blachy poziomej stopy: a , b - wymiary płyty poziomej stopy słupa, h , B - wymiary trzona słupa

Strefy maksymalnych wysięgów docisku c wyznaczać należy ze wzoru:

$$c = t_p \sqrt{\frac{f_y}{3 f_{jd}\ \gamma_{M0}}}, \qquad (7.23)$$

gdzie:

t_p – projektowana grubość blachy poziomej,

f_{jd} – wytrzymałość betonu na docisk.

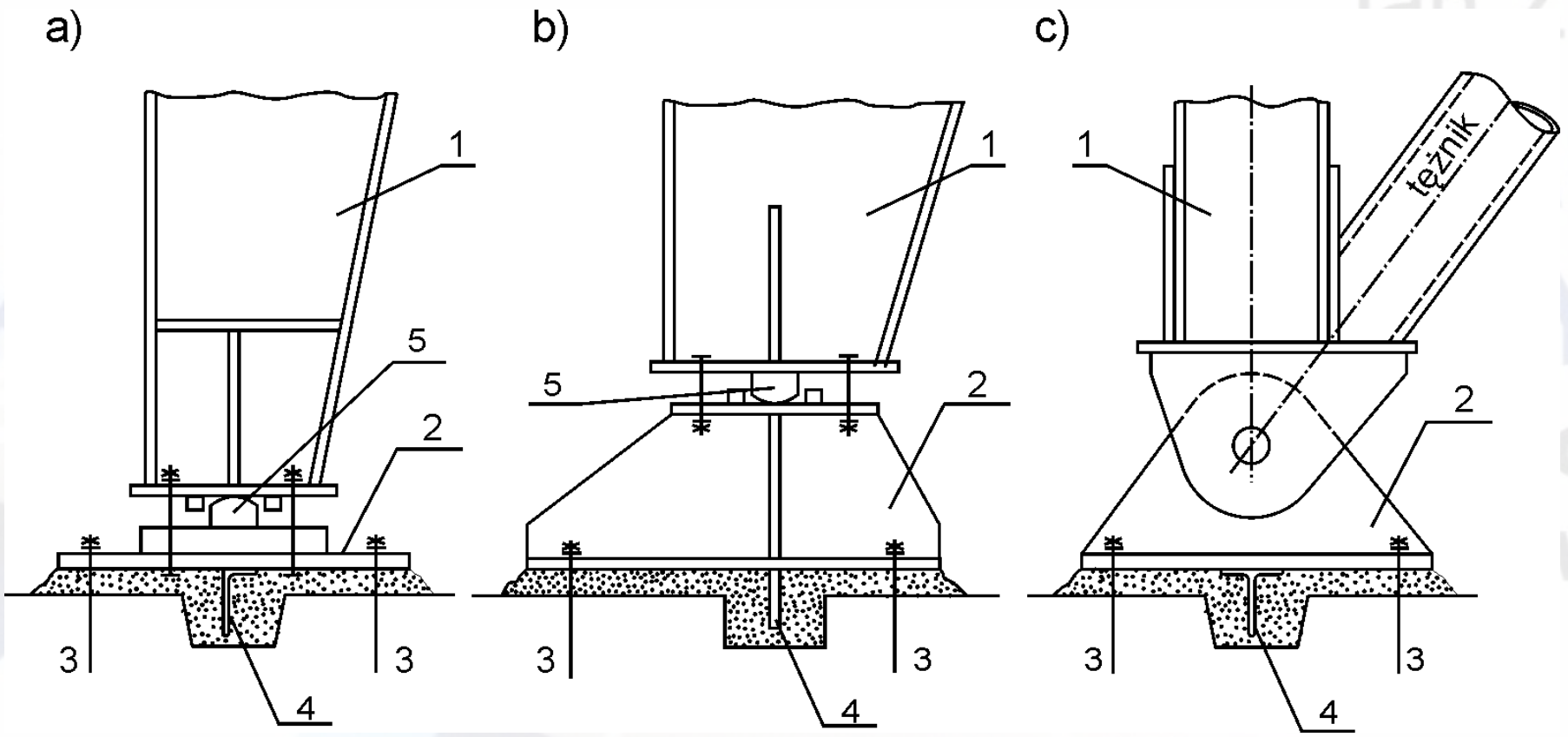
Nośność obliczeniowa blachy poziomej słupa ściskanego osiowo należy wyznaczać wg wzoru:

$$N_{Rd} = \sum N_{C,Rd,i} = \sum_{i=1} f_{jd}\ b_{eff,i}\ l_{eff,i}, \qquad (7.24)$$

gdzie:

$b_{eff,i}$, $l_{eff,i}$ – wymiary wydzielonych króćców pod strefami ściskanymi przekroju trzona słupa.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



Rys. 7.24. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych nominalnie przegubowych stóp słupa: 1 – trzon, 2 – płyta (podpora) fundamentowa, 3 – śruby kotwiące, 4 – elementy ograniczające poślizg, 5 – płytka centrująca

7.10.5. Stopa sztywna słupa, bez żeber usztywniających

Stopa jest oceniana jako sztywna jeśli jej sztywność obrotowa początkowa $S_{j,ini}$ jest większa od trzydziestokrotnej sztywności trzona słupa, czyli

$$S_{j,ini} \geq 30 \frac{E\, I_c}{h_c}, \qquad (7.28)$$

gdzie:

I_c – moment bezwładności przekroju poprzecznego trzona słupa,

h_c – wysokość słupa.

Sztywność obrotową $S_{j,ini}$ można obliczyć wg wzoru z tablicy 7.10.4.

Stopa sztywna słupa zazwyczaj jest obciążona siłą ściskającą i momentem zginającym.

W wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych ustrojów stalowych projektuje się stopy sztywne obciążone tylko siłą osiową. Stopa sztywna, jako węzeł dolnego końca, zmniejsza długość wyboczeniową słupa, ponadto zwiększa ogólną stateczność projektowanego ustroju.

Jan Żmuda PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

Stopa sztywna obciążona siłą osiową

Nośność obliczeniową na docisk stopy sztywnej określa się wg zasad, jak dla stopy przegubowej, a więc wg wzoru (7.23, 7.24). Nośność stopy na poślizg lub ścinanie śrub kotwiących można obliczyć wg wzorów (7.26, 7.27).

Nośność obliczeniową $M_{j,Rd}$ na zginanie stopy sztywnej nie obciążonej zewnętrznym momentem zginają M_{Ed} można obliczyć z warunków równowagi:

$$F_{T,Rd} + N_{Ed} = F_{c,Rd}, \tag{7.29a}$$

$$F_{T,Rd}\ z_t + A_{eff,M}\ z_c\ f_{jd} = M_{j,Rd}, \tag{7.29b}$$

gdzie:

$F_{T,Rd}$ – obliczeniowa nośność półki króćca teowego,

$F_{T,Rd} = \min\left\{F_{T,1,Rd}, F_{T,2,Rd}, \sum F_{t,Rd}\right\}$

$\sum F_{t,Rd}$ – obliczeniowa nośność na rozciąganie śrub kotwiących,

$$F_{t,Rd} = 0{,}9\ A_s\ f_{ub} / \gamma_{M2}, \qquad (7.30)$$

f_{ub} – wytrzymałość śruby na rozciąganie,

A_s – pole przekroju śruby w części gwintowanej,

$F_{c,Rd} = A_{eff,M}\ f_{jd}$

$A_{eff,M}$ – efektywne pole pod pasem ściskanym króćca umownego

$$A_{eff,M} = z_0 \left(2\,c + b_f\right), \qquad (7.31)$$

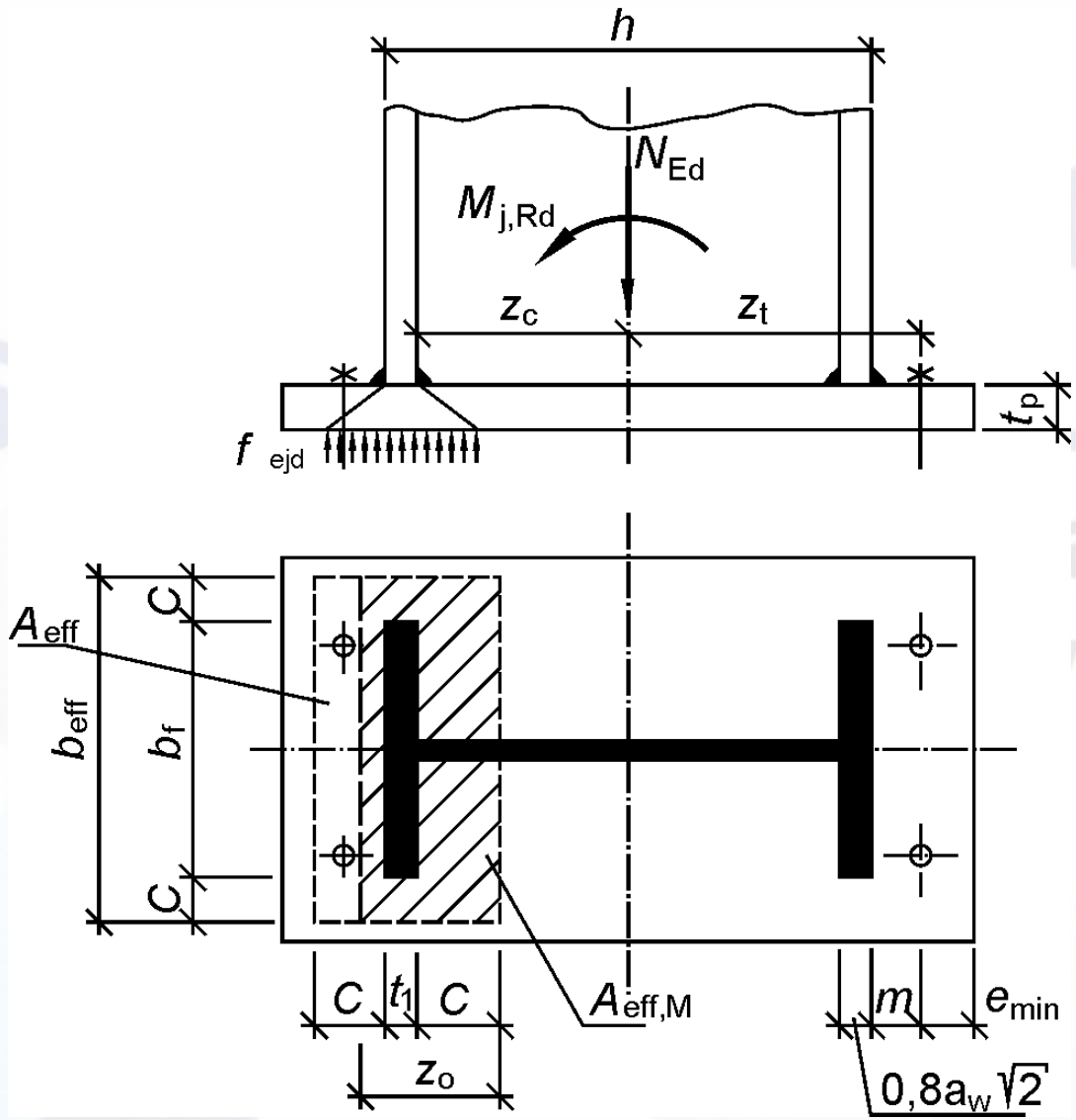
z_0 – szerokość strefy ściskanej (rys. 7.25) króćca teowego:

z równania (7.31)

$$z_0 = \frac{A_{eff,M}}{2\,c + b_f} \qquad (7.32)$$

$$z_0 \le t_f + 2\,c\,. \qquad (7.33)$$

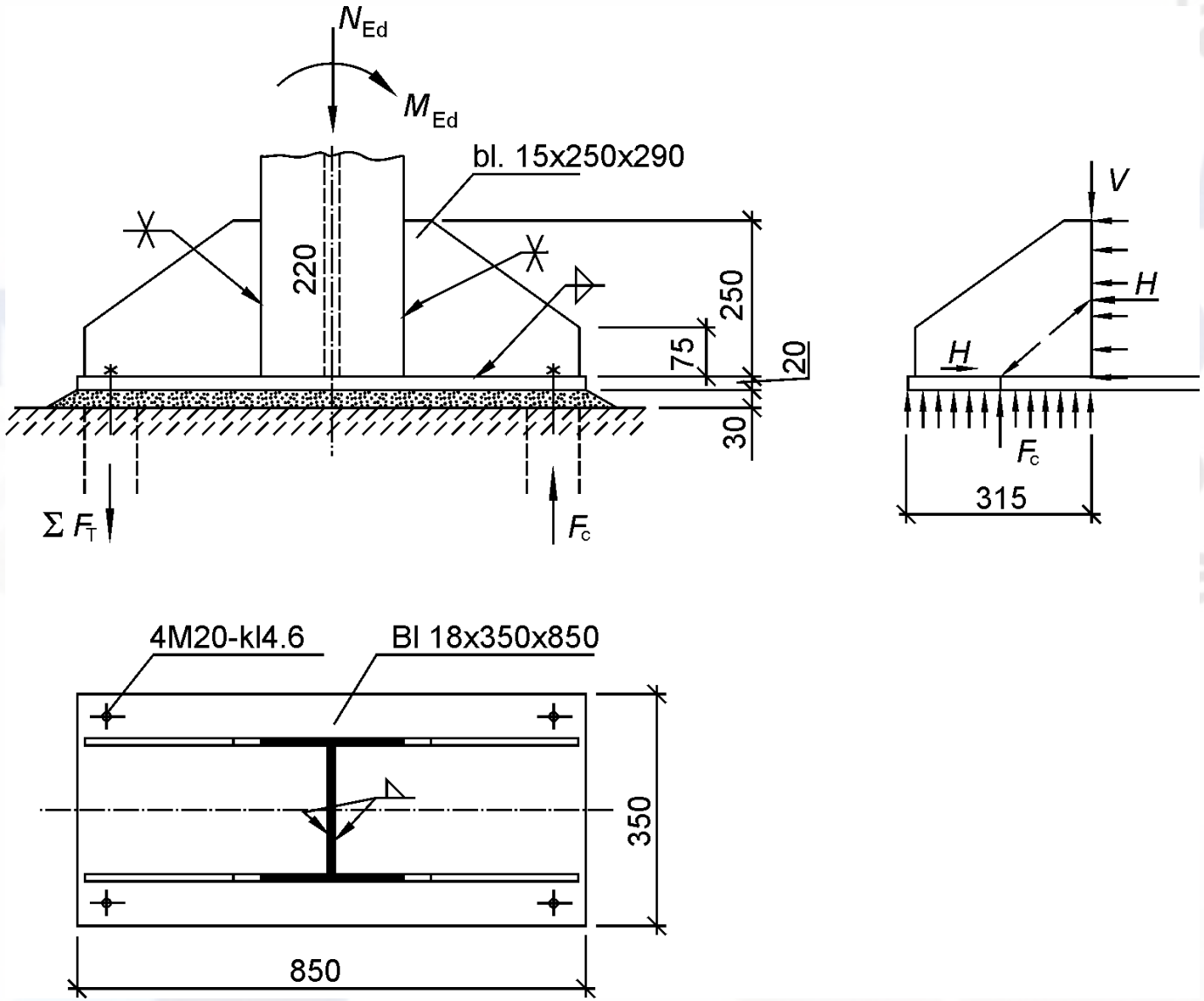
Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



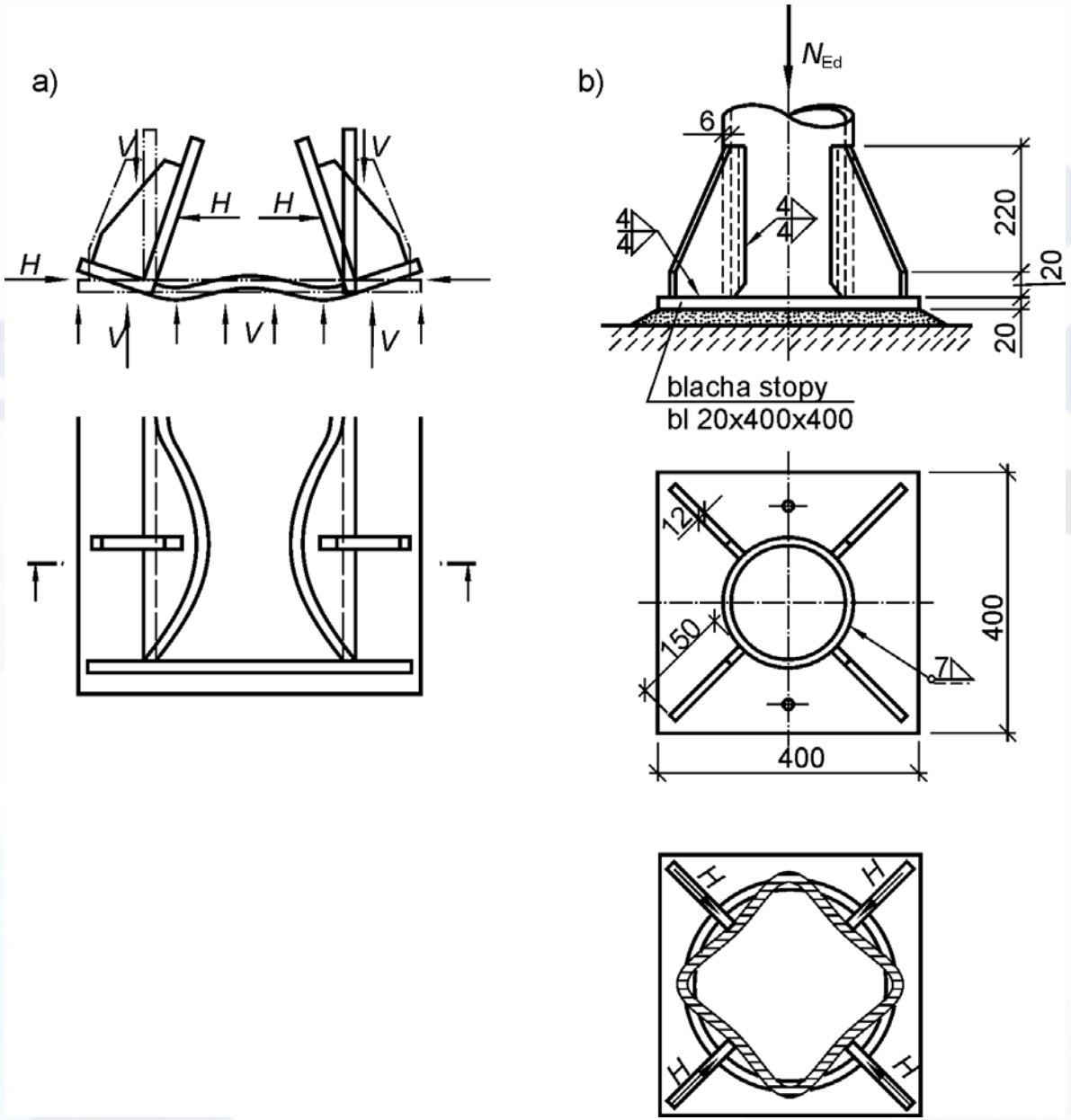
Rys. 7.25. Obciążenie stopy słupa

7.10.6. Stopa sztywna użebrowana obciążona osiową siłą ściskającą i momentem zginającym

Żebra usztywniające blachę czołową stopy projektuje się przy dużych obciążeniach zarówno siłą ściskającą, jak też momentem zginającym. Blacha czołowa stopy ma kształt prostokąta, przy czym dłuższy jej wymiar usytuowany jest w płaszczyźnie działania momentu zginającego (rys. 7.28).



Rys. 7.28. Stopa sztywna słupa użebrowana



Rys. 7.29. Odkształcenia ścianek słupa i blachy czołowej

Wymaganą nośność obliczeniową śrub kotwiących na rozciąganie $\sum F_{t,Rd}$ można obliczyć z równania 7.29a uwzględniając, że $\sum F_{t,Rd} = \min\left\{\sum F_{t,Rd}, F_{T,1,Rd}, F_{T,2,Rd}\right\}$ lub z warunku równowagi

$$\sum F_{t,Rd}\ Z - M_{Ed} + N_{Ed}\ Z_c = 0, \tag{7.36}$$

a stąd

$$\sum F_{t,Ed} = \frac{M_{Ed} - N_{Ed}}{2} \cdot Zc\,.$$

Ramię Z_C zależy od wartości mimośrodu

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}\ .$$

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Jeśli $e > h/2 + \frac{t_f}{2}$, to $Z_C = \frac{h}{2} + c - \frac{Z_0}{2}$,

natomiast gdy $e = \frac{h}{2} + \frac{t_f}{Z}$, to

$$Z_C = \frac{h}{2} - \frac{t_f}{2},\ Z = Z_t + Z_C,\ Z_t = \frac{a}{2} - e_1.$$

Przy niewielkich wartościach momentów zginających M_{Ed}, a zwłaszcza, gdy mimośród $e < (h - t_t)/2$, to średnice śrub i ich klasy można przyjmować a priori, czyli metodą prób i błędów.

Nośność śrub ścinanych i rozciąganych należy sprawdzić wg wzoru z tablicy 3.4 normy PN–EN 1993–1–8, a mianowicie:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1{,}4F_{t,Rd}} \le 1,$$

(7.37)

gdzie:

$F_{v,Ed}$, $F_{t,Ed}$ – obciążone śruby siły ścinającej i rozciągającej,

$F_{v,Rd}$, $F_{t,Rd}$ – nośność obliczeniowa śruby na ścinanie i rozciąganie.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz. 1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

7.10.7. Sztywność obrotowa początkowa stopy

Sztywność obrotową stopy $S_{j,ini}$ poddanej równoczesnemu obliczeniu siłą osiową i momentem zginającym należy obliczać wg wzorów z tablicy

Współczynniki sztywności k_{ij} należy uwzględniać do obliczania:

- betonu w strefie ściskanej,
- blachy czołowej zginanej w strefie rozciąganej,
- śrub kotwiących.

W tablicy 7.10.5 podano wzory na obliczanie współczynników sztywności k_{ij} stosowanych do obliczania współczynników $k_{T,l}$, $k_{T,r}$, $k_{C,l}$, $k_{C,r}$.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy kratownice

Efekty obciążenia	Ramię sił z	Sztywność początkowa $S_{j,ini}$	
Lewa strona rozciągana, prawa strona ściskana	$z = z_{T,l} + z_{C,r}$	$N_{Ed} > 0$ i $e > z_{T,l}$	$N_{Ed} \le 0$ i $e \le -z_{C,r}$
		$\frac{Ez^2}{\frac{1}{k_{T,l}} + \frac{1}{k_{C.r}}} \cdot \frac{e}{e + e_k}$, gdzie $e_k = \frac{z_{C,r}k_{C,r} - z_{T,l}k_{T,l}}{k_{T,l} + k_{C,r}}$	
Lewa strona rozciągana, prawa strona rozciągana	$z = z_{T,l} + z_{T,r}$	$N_{Ed} > 0$ i $0 < e < z_{T,l}$	$N_{Ed} > 0$ i $-z_{T,r} < e \le 0$
		$\frac{Ez^2}{\frac{1}{k_{T,l}} + \frac{1}{k_{T,r}}} \cdot \frac{e}{e + e_k}$, gdzie $e_k = \frac{z_{T,r}k_{T,r} - z_{T,l}k_{T,l}}{k_{T,l} + k_{T,r}}$	
Lewa strona ściskana, prawa strona rozciągana	$z = z_{C,l} + z_{T,r}$	$N_{Ed} > 0$ i $e \le -z_{T,r}$	$N_{Ed} \le 0$ i $e > z_{C,l}$
		$\frac{Ez^2}{\frac{1}{k_{C,l}} + \frac{1}{k_{T,r}}} \cdot \frac{e}{e + e_k}$, gdzie $e_k = \frac{z_{T,r}k_{T,r} - z_{C,l}k_{C,l}}{k_{C,l} + k_{T,r}}$	
Lewa strona ściskana, prawa strona ściskana	$z = z_{C,l} + z_{C,r}$	$N_{Ed} \le 0$ i $0 < e < z_{C,l}$	$N_{Ed} \le 0$ i $-z_{C,r} < e \le 0$
		$\frac{Ez^2}{\frac{1}{k_{C,l}} + \frac{1}{k_{C,r}}} \cdot \frac{e}{e + e_k}$, gdzie $e_k = \frac{z_{C,r}k_{C,r} - z_{C,l}k_{C,l}}{k_{C,l} + k_{C,r}}$	

$M_{Ed} > 0$ jest zgodne ze wskazówkami zegara, $N_{Ed} > 0$ przy rozciąganiu,

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}}$$

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
słupy, ramownice

8. POPRZECZNE UKŁADY NOŚNE SŁUPOWO - RYGLOWE

Układy słupowo – ryglowe w szczególności z ryglami kratowymi stosowane są:

- na główne nośne ustroje hal parterowych magazynowych, przemysłowych,
- w budownictwie drogowym na konstrukcje wsporcze znaków informacyjnych,
- w budownictwie kolejowym na konstrukcje wsporcze trakcji elektrycznych.

Rygle kratowe w zależności od ich kształtu geometrycznego mogą być połączone ze słupami węzłami przegubowymi np. trójkątnymi lub sztywnymi (np. 7.2a, 1, 2) np. dwutrapezowe, prostokątne. Słupy układów poprzecznych mogą być pełnościenne lub złożone przewiązkowe bądź kratownicowe.

Jeżeli rygiel połączony jest ze słupami węzłami sztywnymi, to rozkład momentów zginających w układzie słupowo – reglowym będzie zbliżony do rozkładu momentów zginających w ustroju nazywany ramą, oczywiście przy jednakowych obciążeniach. Cechą charakterystyczną ramy odróżniającą ją od układu przegubowego słupowo - ryglowego jest sztywność węzłów łączących rygle ze słupami, a zatem zdolność przekazywania części momentów zginających przęsłowych rygli na słupy.

8.2. Stężenia słupów poprzecznych układów nośnych

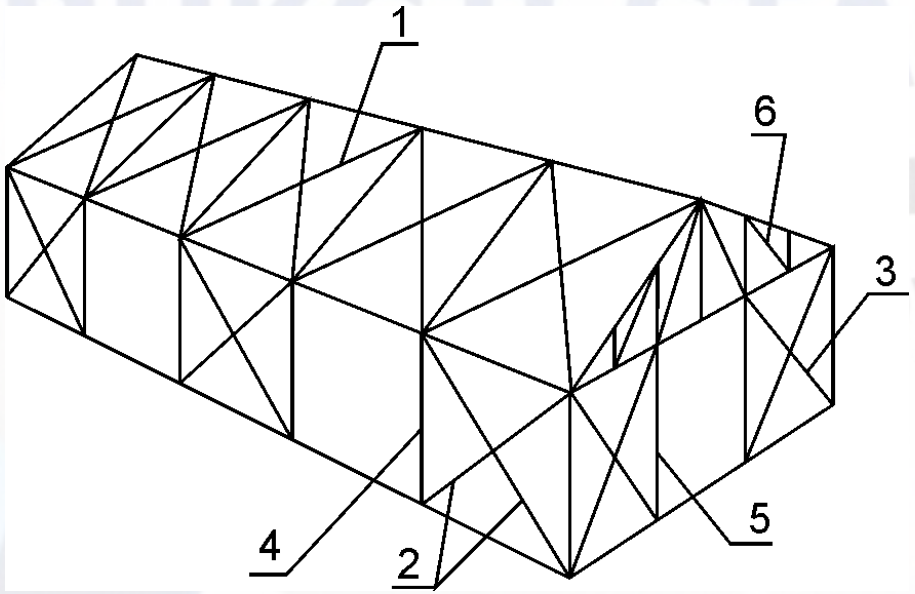
Stężenia słupów projektuje się w budynkach parterowych i wielokondygnacyjnych.
W budynkach parterowych, zwłaszcza halach, stosowane są stężenia międzysłupowe pionowe i poziome w linii słupów w kierunku podłużnym, a w niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych w linii słupów ścian szczytowych. Nie w każdej konstrukcji szkieletu hali te stężenia równocześnie występują.

8.2.2. Stężenia hal lekkich

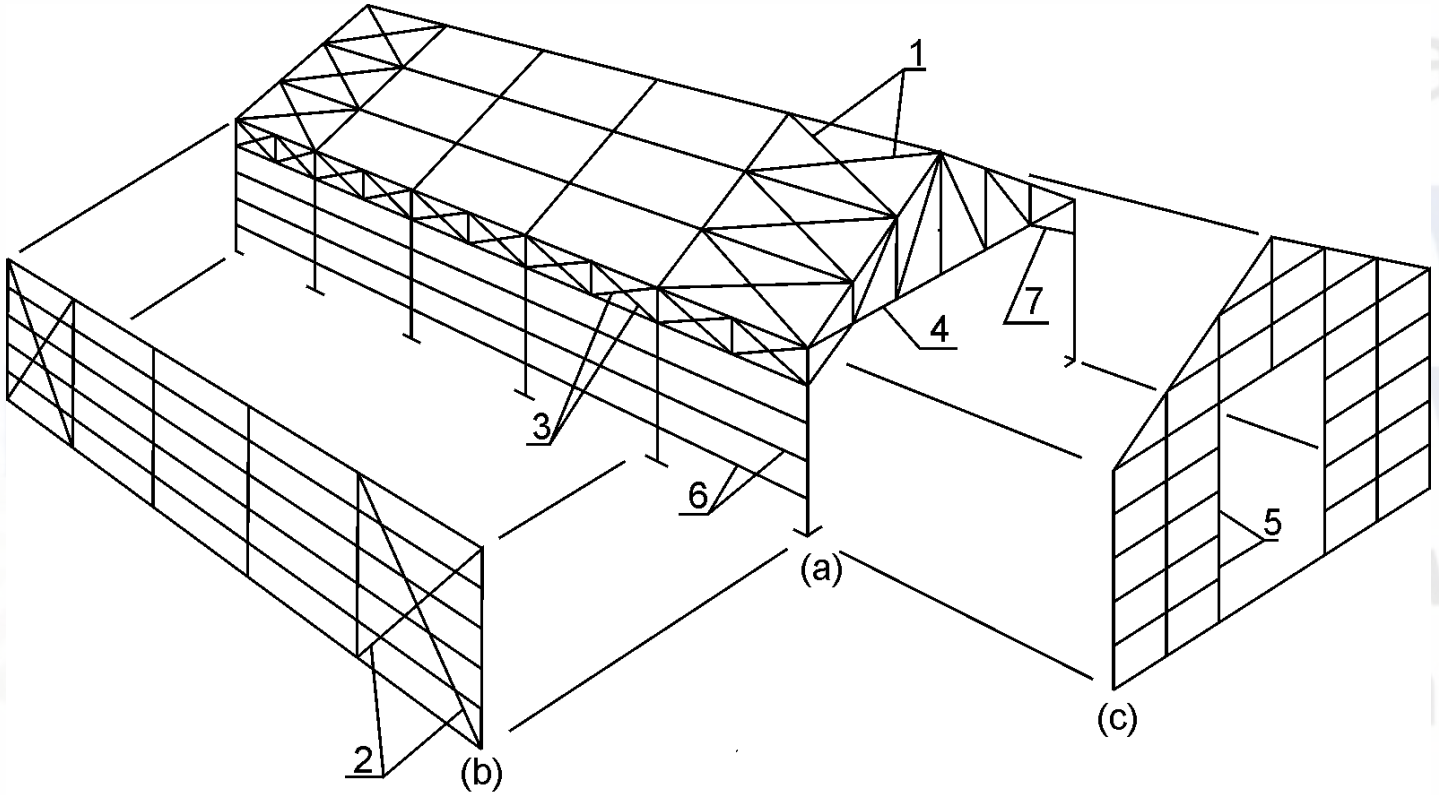
Stateczność hali z chwiejnymi układami poprzecznymi zapewniają stężenia pionowe (rys. 8.1) słupów w kierunku podłużnym i w ścianach poprzecznych (3) oraz stężenia połaciowe (1). Słupy układów poprzecznych z górnymi i dolnymi węzłami przegubowymi są oszczędne, zarówno w aspekcie zużycia stali jak też kosztów wykonawstwa. Obciążenia wiatrem działające na ściany podłużne przenoszone są na fundamenty przez stężenia pionowe w ścianach szczytowych (3), natomiast działania wiatru na ściany szczytowe przekazywane są na fundamenty przez stężenia pionowe słupów (2) w linii podłużnej hali. Wymiary takich hal są jednak ograniczone, zarówno w kierunku podłużnym, jak też poprzecznym.

Stężenie pionowe słupów w kierunku podłużnym lekkiej hali magazynowej pokazano na rys. 8.2. Stopy słupów w kierunku podłużnym połączone mogą być z fundamentami sztywno lub przegubowo. Stateczność hali zapewnić może stężenie portalowe wzdłuż hali (rys. 8.2a), jeśli obciążenia wiatrem są umiarkowane. Dla dowolnych obciążeń od wiatru stateczność słupów zapewniają międzysłupowe stężenia pionowe (rys. 8.2b).

Jeśli układy nośne są samostateczne w kierunku poprzecznym (w płaszczyźnie układu), a rygle ścian szczytowych oparte są na słupach końcowych głównych, to nie są konieczne stężenia pionowe ścian szczytowych. Słupy pośrednie tych ścian (rys. 8.2c) umożliwiają wykonanie ściany osłonowej.



Rys. 8.1. Stężenia słupów z węzłami przegubowymi na górnych i dolnych końcach: 1 – stężenie połaciowe dachu, 2 – stężenie pionowe podłużne, 3 – stężenie pionowe ściany szczytowej, 4 – słup układu poprzecznego słupowo – ryglowego, 5 – słup pośredni ściany szczytowej, 6 – rygle kratownicowe



Rys. 8.2. Stężenia słupów w kierunku podłużnym: a) stopy słupów sztywno połączone w kierunku podłużnym, b) stopy słupów przegubowo połączone w kierunku podłużnym, c) układ ryglowo – słupowy ściany szczytowej, 1 – stężenie połaciowe poprzeczne, 2 – stężenie pionowe podłużne słupów, 3 – stężenie portalowe, 4 – układ poprzeczny słupowo – ryglowy, 5 – słupy pośrednie i rygle ściany szczytowej, 6 – rygle ściany podłużnej, 7 - tężnik kolankowy

8.2.3. Stężenia podłużne hal przemysłowych

Stężenia podłużne w halach przemysłowych składają się z:

- stężeń pionowych międzysłupkowych kratownic dachowych,
- stężeń części nadsuwnicowych słupów głównych usytuowanych między poziomem pasów dolnych wiązarów kratownicowych, a poziomem belki podsuwnicowej,
- stężeń międzysłupowych usytuowanych pomiędzy poziomami belek podsuwnicowych, a poziomem stóp fundamentowych.

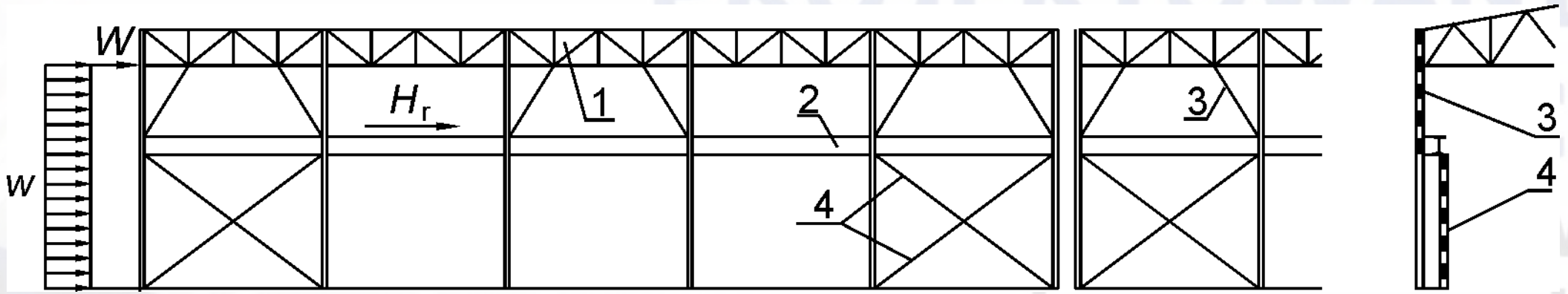
Stężenia pionowe między słupkami wiązarów dachowych omawiano w p. 6.7.4.

Przy dużych rozstawach poprzecznych układów nośnych rolę tego stężenia mogą spełniać kratownice podwiązarowe (portale).

Tężniki nad belką podsuwnicową projektowane są w polach skrajnych tj. przy ścianach szczytowych i przy dylatacjach (rys.8.3).

Jan Żmuda PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
słupy, ramownice



Rys. 8.3. Schemat stężeń pionowych w osiach podłużnych słupów: 1 – podciąg kratowy, 2 – belka podsuwnicowa, 3 – stężenia części nadsuwnicowych, 4 – stężenia części podsuwnicowych słupów

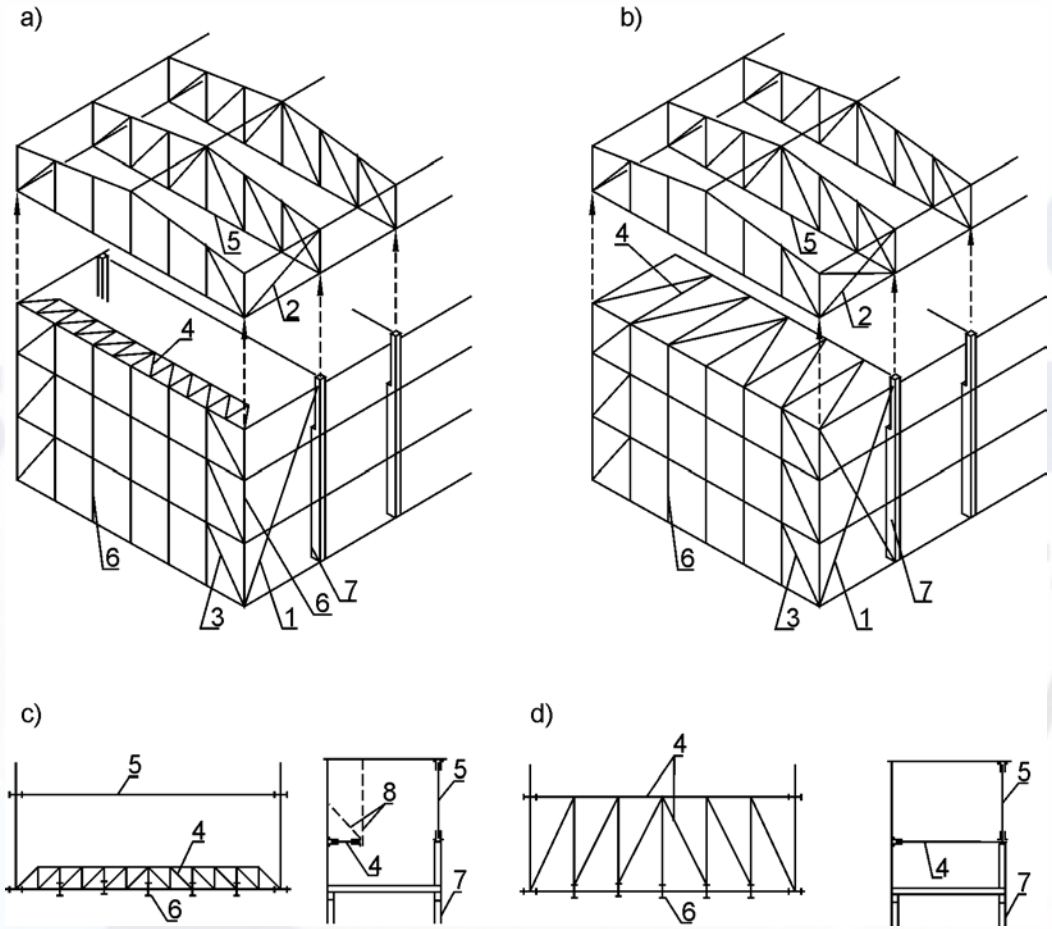
8.2.4. Stężenia poziome i pionowe ścian szczytowych

W halach o dużych wysokościach projektuje się stężenia poziome, nazywane także wiatrownicami, podpierające słupy pośrednie ścian szczytowych (rys. 8.5). Tężnik poziomy może być podwieszony do dachu lub podparty na słupach ściany szczytowej (rys. 8.5a, c). Jeśli tężnik poziomy jest wykorzystywany również na element konstrukcyjny pomostu remontowego suwnic, to podpiera się go na słupach głównych hali.

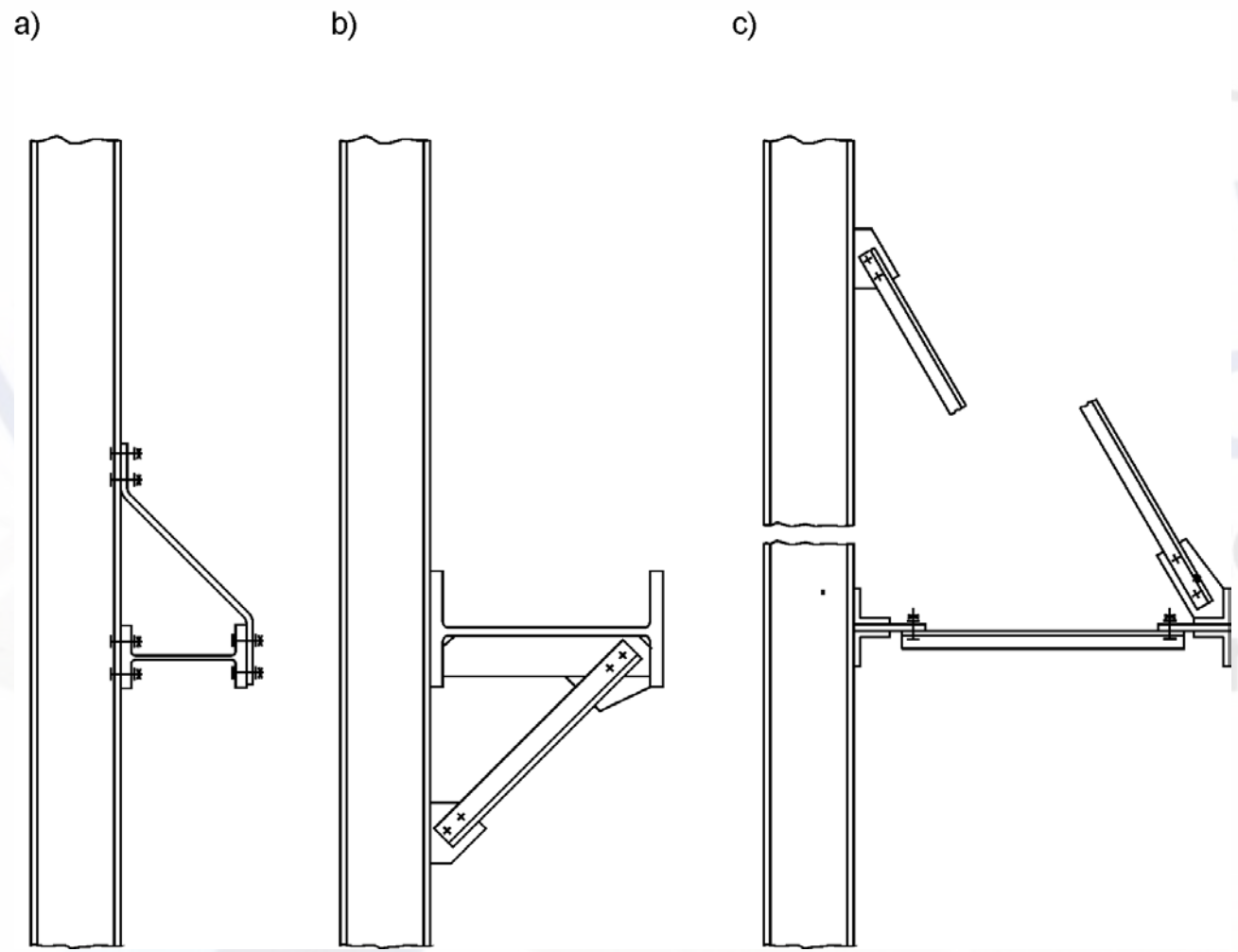
Podparcie słupów ścian szczytowych tężnikami poziomymi powoduje:

- zmniejszenie momentów zginających w tych słupach od działania wiatru na ściany szczytowe,
- zmniejszenie długości wyboczeniowych tych słupów.

Tężniki poziome są kratownicami, jeśli rozpiętości hali są znaczniejsze. W przypadku wąskich hal (<18 m) na tężniki poziome projektuje się dwuteowniki walcowane lub spawane. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych tężników poziomych ścian szczytowych pokazano na rys. 8.6.



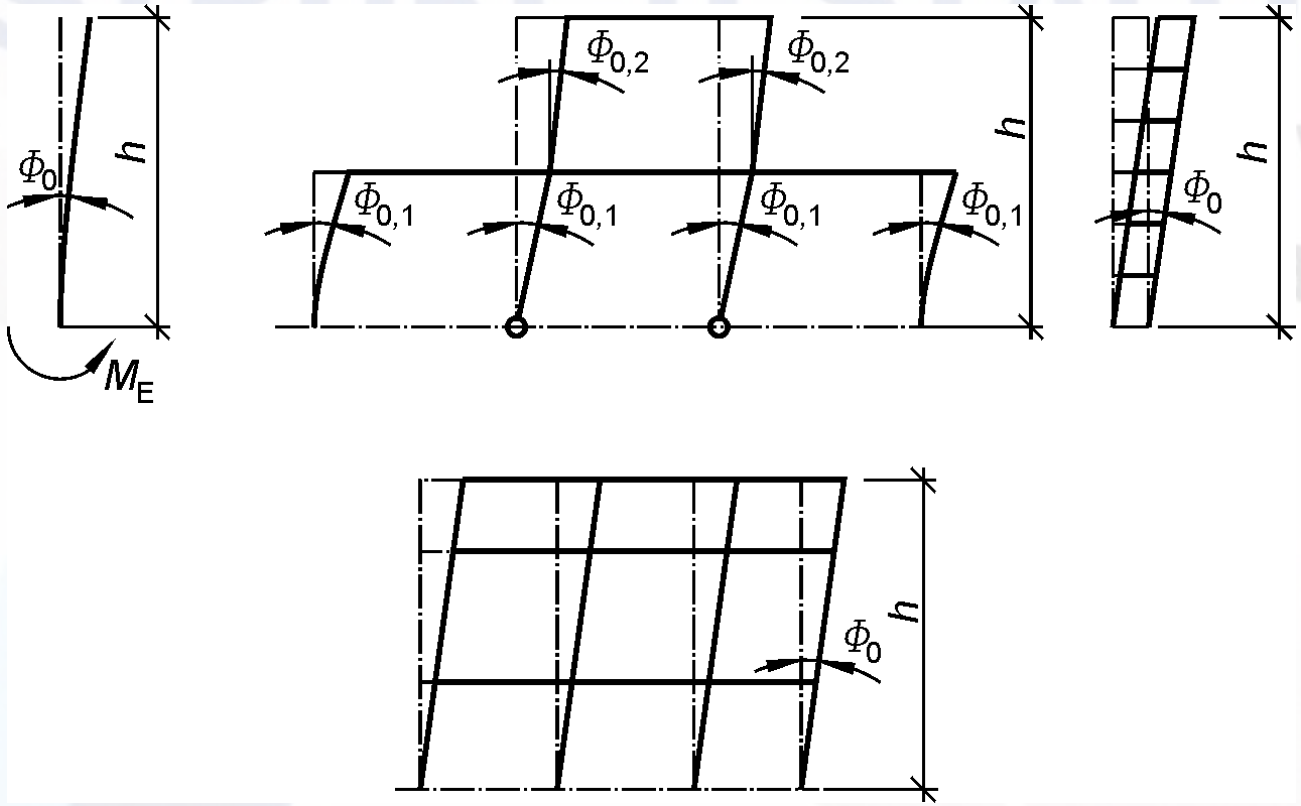
Rys. 8.5. Stężenie pionowe i poziome ścian szczytowych: a) układy stężeń, b) sposoby podwieszania (podparcia) tężników poziomych: 1 – stężenie pionowe międzysłupowe podłużne, 2 – stężenie pionowe wiązarów kratownicowych, 3 – stężenie pionowe ściany szczytowej, 4 – tężnik poziomy ściany szczytowej, 5 – wiązar dachowy, 6 – słup ściany szczytowej, 7 – podpora pomostu obsługi, c) podwieszenie tężnika poziomego do dachu lub podparcie na słupach ścian szczytowych, d) podparcie tężnika poziomego na słupach głównych hali



Rys. 8.6. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych tężników poziomych ścian szczytowych: a) tężnik z dwuteownika walcowanego podwieszony do słupów ściany szczytowej, b) tężnik dwuteowy spawany podparty zastrzałami, c) tężnik kratownicowy podwieszony do słupów ścian szczytowych

8.3.1. Imperfekcje globalne

Nachylenie (rys. 8.7) w stanie początkowym osi ściskanego pręta lub ustroju słupowo – belkowego generuje dodatkowe naprężenie normalne w przekrojach poprzecznych.



Rys. 8.7. Przykłady przechyłów (nachyleń początkowych) prętów i ustrojów prętowych

Imperfekcje przechyłowe początkowe ϕ_0 w obliczeniach statycznych można zastąpić przyrostami wartości reakcji podporowych, to znaczy składowymi $H_{0,i}$ poziomymi i podporowymi momentami zginającymi (rys. 8.8) $M_\phi = H_{0,i}\ h$.

Jeżeli słupy parterowych układów poprzecznych samostatecznych w płaszczyźnie układu (rys. 8.9a) w kierunku podłużnym są stężone, to siły przekrojowe tężnika ramowego (rys. 8.9b) winny być obliczane także od dodatkowego obciążenia ΔH wywołanego imperfekcjami słupów:

$$H_0 = \Delta H = \phi_0\ \alpha_h\ \alpha_m \sum_{i=1}^{n} N_{i,Ed}\ , \tag{8.1}$$

w którym:

$\sum_{i=1}^{n} N_{i,Ed}$ - suma obciążeń obliczeniowych pionowych słupów podpieranych tężnikiem,

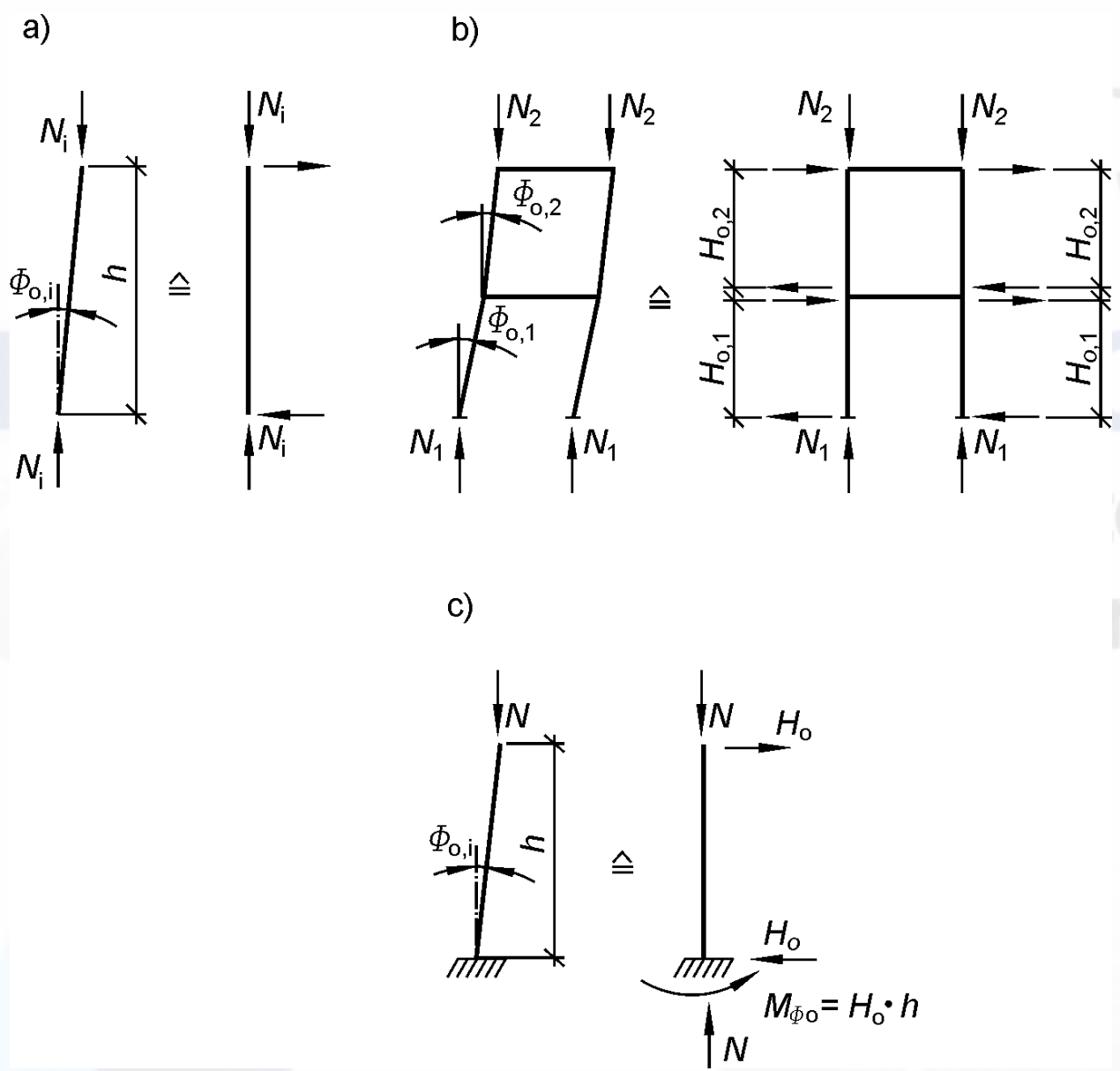
ϕ_0 - kąt przechyłu początkowego; należy obliczać ze wzoru $\phi_0 = \frac{1}{200}$,

(8.2)

α_h – współczynnik redukcyjny ze względu na wysokość pręta:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ lecz } \frac{2}{3} \le \alpha_h \le 1{,}0\,, \tag{8.3}$$

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



Rys. 8.8. Równoważne zastąpienie globalnych imperfekcji początkowych reakcjami podporowymi: a) pojedynczy pręt, b) ramy, c) słup utwierdzony

h – wysokość pręta lub ustroju prętowego,

α_m – współczynnik redukcyjny ze względu na liczbę słupów:

$$\alpha_m = \sqrt{0{,}5\left(1+\frac{1}{m}\right)}, \tag{8.4}$$

m – liczba słupów w rzędzie, przy czym uwzględniać należy tylko te słupy, które przenoszą obciążenia N_{Ed} nie mniejsza niż 50 % przeciętnego obciążenia słupa w rozpatrywanej płaszczyźnie.

Imperfekcje przechyłowe można pomijać, jeśli spełniony jest warunek:

$$H_{Ed} \geq 0{,}15\, V_{Ed}, \tag{8.5}$$

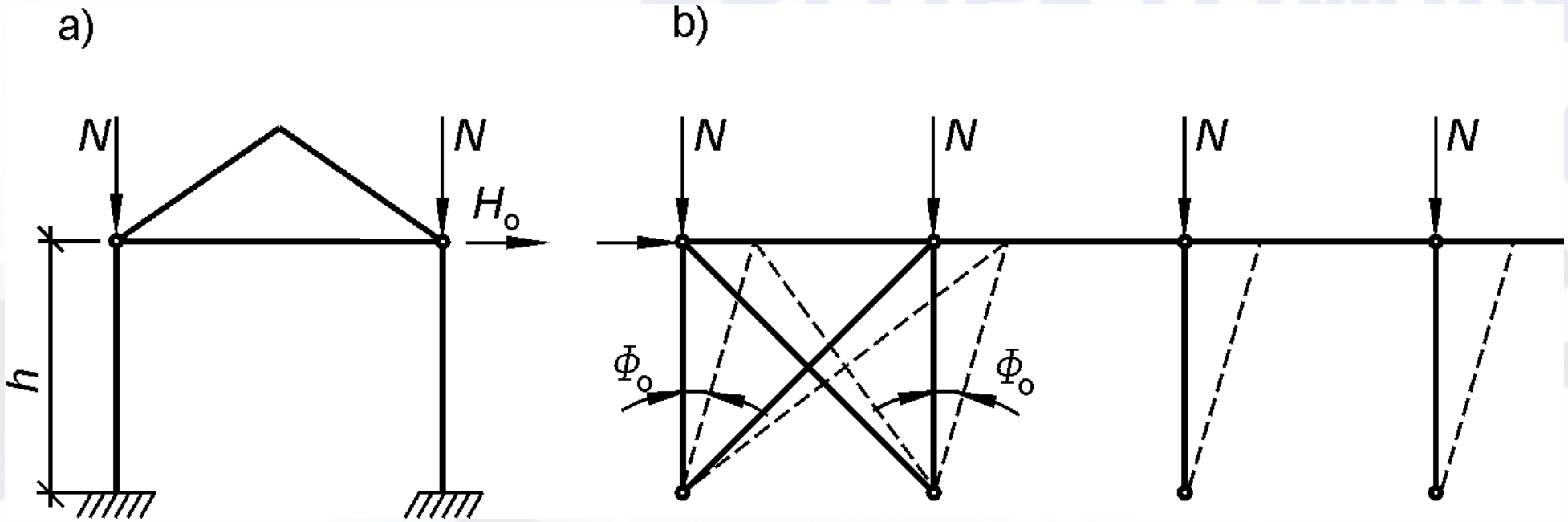
gdzie:

H_{Ed} – obciążenie poziome pręta lub ustroju prętowego,

V_{Ed} – łączne obciążenie pionowe.

Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz. 1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

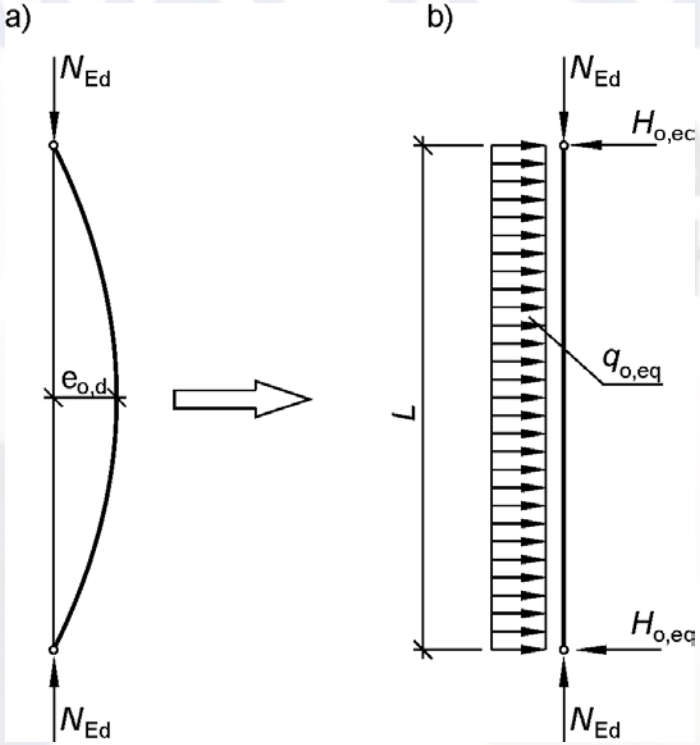
Jan Żmuda



Rys. 8.9. Przechyły początkowe stężanych słupów układów poprzecznych

8.3.2. Imperfekcje lokalne

Niedoskonałości lokalne uwzględniają nieosiowość ściskanego pręta jako wyodrębnionego słupa ramy parterowej lub słupa kondygnacji ramy wielokondygnacyjnej. Zgodnie z normą PN–EN 1993–1–1 zakłada się, że elementy ściskane mają a priori poziome ugięcie $e_{0,d}$ jest na rys. 8.10a, którego wartość można obliczyć zgodnie z wartościami tablicy 8.1.



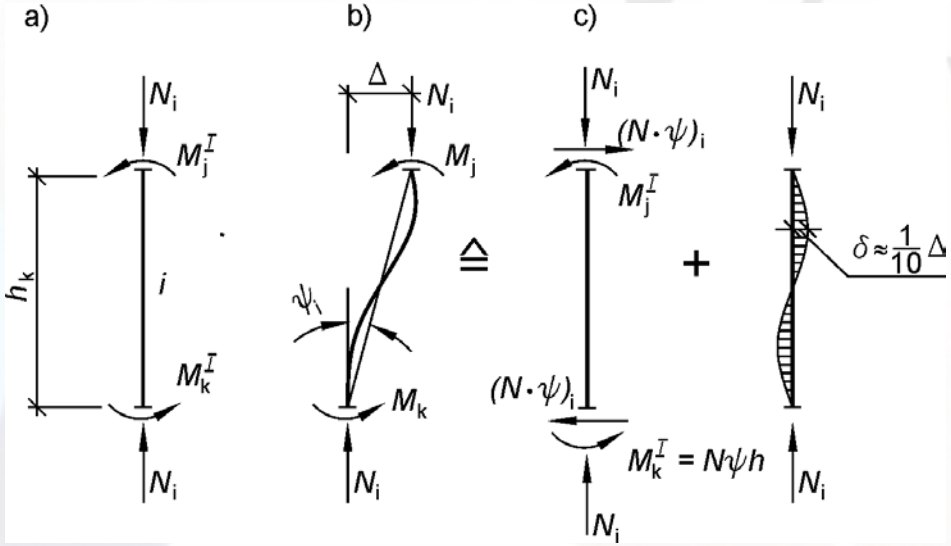
Rys. 8.10. Imperfekcje lokalne: a) kształt osi pręta z imperfekcją, b) siły równoważne imperfekcjom

8.4. Analiza statyczna I i II rzędu

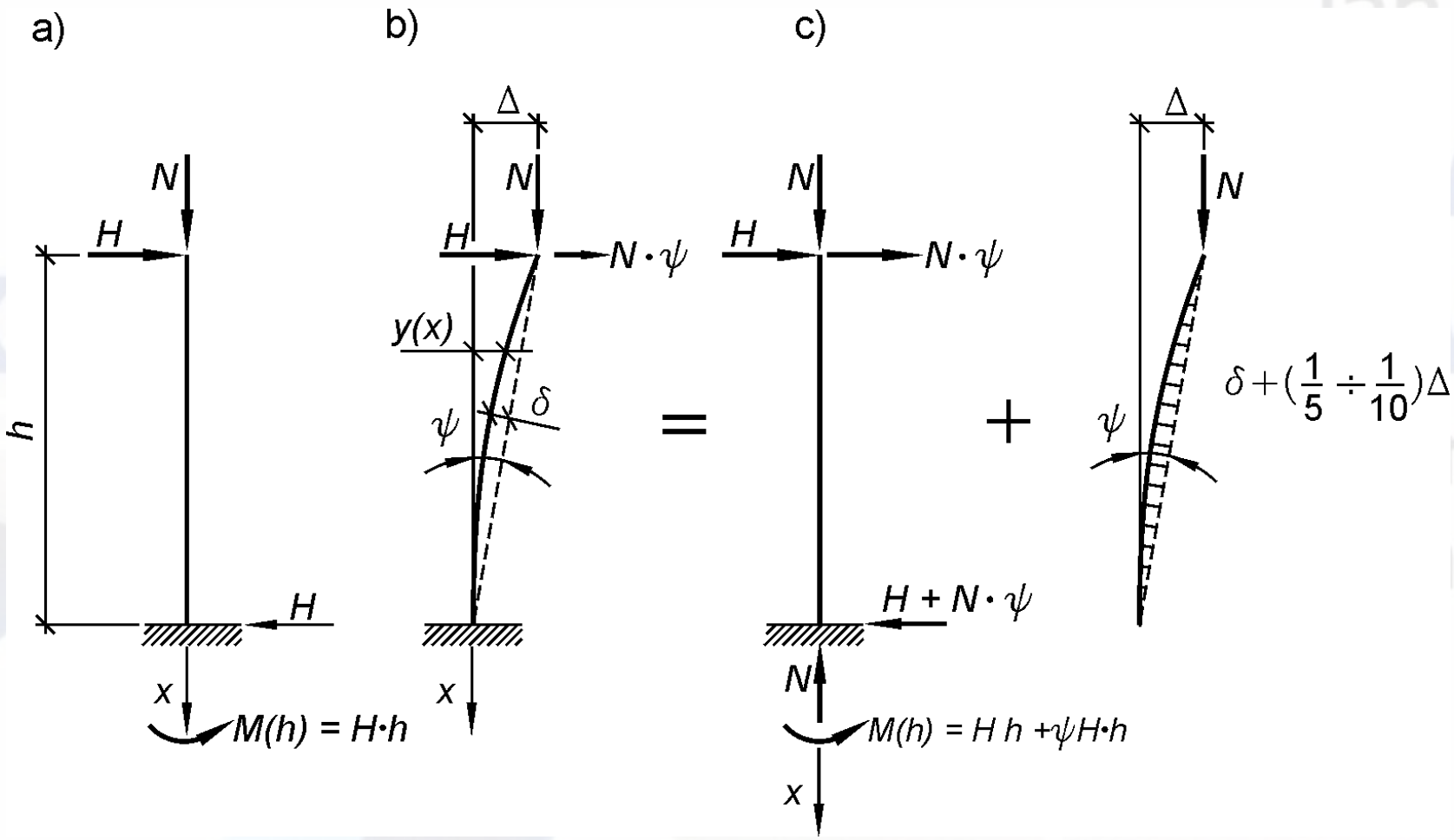
Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE
KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe,
y, ramownice

Do określenia sił przekrojowych ściskanych i zginanych elementów konstrukcyjnych można stosować:

- analizę pierwszego rzędu, przy założeniu zachowania pierwotnej, bez imperfekcji lokalnej, nieodkształconej obciążonej geometrii układu (rys. 8.11a, 8.12a),
- analizę drugiego rzędu z uwzględnieniem wpływu przemieszczeń geometrii układu prętowego, spowodowanych obciążeniem, na obliczanie statyczne (rys. 8.11b, c, 8.12b, c).



Rys. 8.11. Obliczenia statyczne sił przekrojowych wyodrębnionego słupa kondygnacji ramy (z rys. 8.13): a) słup nieodkształcony, b) słup odkształcony, c) ekwiwalentne siły przekrojowe



Rys. 8.12. Obliczenia statyczne słupa wspornikowego: a) słup nieodkształcony (teoria I rzędu), b) słup odkształcony (teoria II rzędu), c) ekwiwalentne siły przekrojowe

Momenty zginające II rzędu, czyli obliczenia uwzględniające wpływ efektów $N - \Delta$ można wykonać kilkoma sposobami:

- analitycznie wykorzystując wzór (8.9) lub równanie różniczkowe osi ugiętej,
- metodą iteracyjną za pomocą programów komputerowych,
- metodą kolejnych przybliżeń,
- metodą uproszczoną, w której siły przekrojowe wyznacza się sposobem tradycyjnym,

czyli dla nieodkształconej geometrii układu prętowego, a następnie przemnaża się współczynnikiem

$$\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}}, \text{ lecz } \alpha_{cr} \geq 3, \tag{8.10}$$

gdzie α_{cr} - mnożnik, który można wyznaczyć ze wzoru (8.13).

8.5. Ocena wrażliwości na efekty II rzędu słupów i układów słupowo – ryglowych

Obliczenia statyczne wg teorii I rzędu można stosować, jeśli spełnione są warunki wrażliwości na efekty II rzędu:

– w przypadku analizy sprężystej

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10, \qquad (8.11)$$

– w przypadku uwzględnienia przegubów plastycznych czyli analizy plastycznej

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15, \qquad (8.12)$$

gdzie:

F_{Ed} – obciążenia obliczeniowe pionowe działające na konstrukcje,

F_{cr} – obciążenie krytyczne odpowiadające globalnej formie utraty stateczności sprężystej i początkowej sztywności sprężystej układu,

α_{cr} – mnożnik obciążenia krytycznego, w stosunku do obciążeń obliczeniowych odpowiadający niestateczności sprężystej układu.

Jan Żmuda PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

W przypadku ram portalowych z dachami z małymi spadkami połaci (< 26°) oraz regularnych wielokondygnacyjnych konstrukcji szkieletowych (rys. 8.13), w których siły osiowe w ryglach poziomych są nieznaczne; mnożniki α_{cr} obliczać można wg następującego uproszczonego wzoru:

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}}\right)\left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}}\right) \tag{8.13}$$

gdzie:

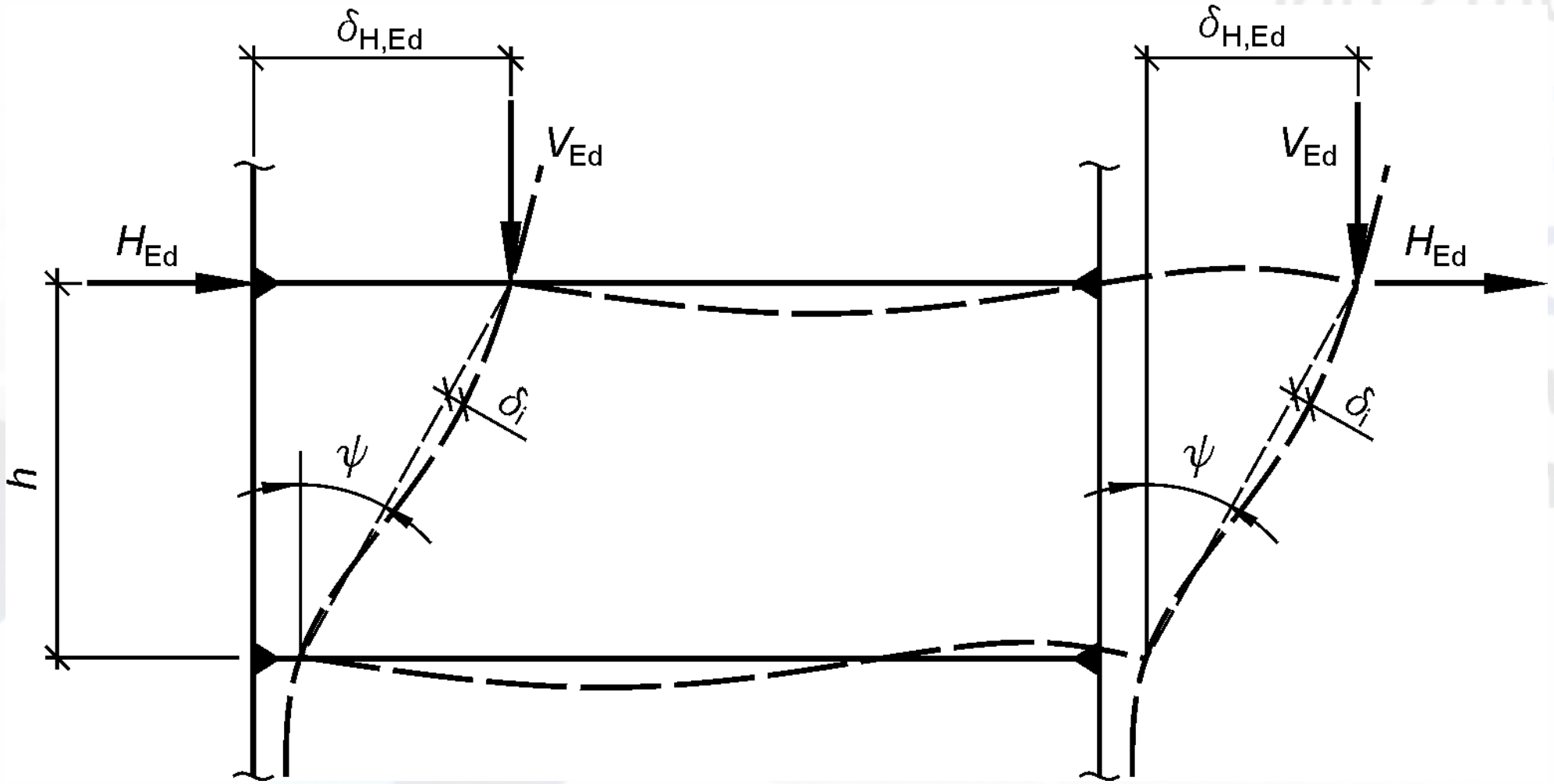
H_{Ed} – obciążenie obliczeniowe poziome w tym fikcyjne zastępcze siły poziome u dołu kondygnacji,

V_{Ed} – suma obciążeń pionowych słupów u dołu kondygnacji,

$\delta_{H,Ed}$ – przemieszczenie poziome węzłów górnych słupów kondygnacji wynikające z obciążeń poziomych,

h – wysokość kondygnacji.

Jan Żmuda PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH cz.1 Belki, dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice



Rys. 8.13. Przemieszczenia i obciążenia słupów i rygli kondygnacji ramy wielokondygnacyjnej

Siły poziome w ryglach ramy (układu prętowego) można ocenić jako nieznaczne, gdy spełnione jest kryterium:

$$\bar{\lambda} < 0{,}3\sqrt{\frac{Af_y}{N_{Ed}}}, \qquad (8.14)$$

gdzie:

$\bar{\lambda}$ - smukłość względna w płaszczyźnie zginania (przemieszczeń poziomych) rygla,

N_{Ed} – obciążenie obliczeniowe ściskające w ryglu.

Jeżeli w obliczeniach statycznych pojedynczych słupów lub układów słupowo – ryglowych (ram) uwzględnia się:

– efekty II rzędu, $N-\Delta$, $N-\delta$,

– imperfekcje globalne ϕ i lokalne e_0,

to nośność słupów oblicza się tylko z warunku nośności przekrojów, bez uwzględnienia ich wyboczenia.

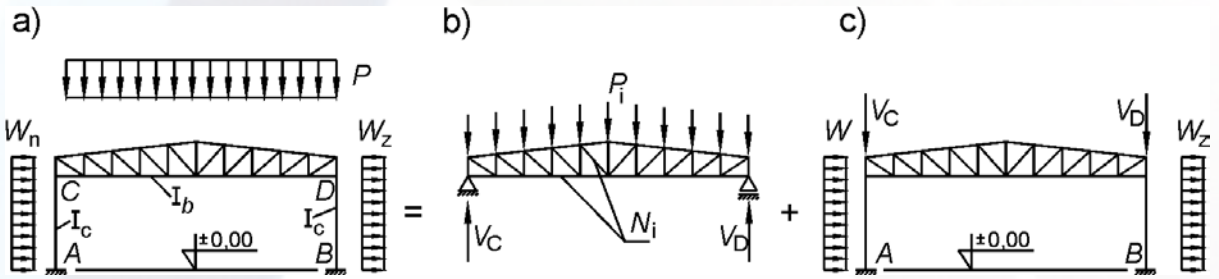
Jan Żmuda
PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

8.6. Przybliżone metody obliczania sił wewnętrznych w poprzecznych układach słupowo – ryglowych

8.6.1. Ogólne zasady

Płaskie układy poprzeczne jako konstrukcje nośne hal pracują w rzeczywistości jako konstrukcje przestrzenne (np. rys. 6.16, 8.2) wskutek wzajemnym połączeniom z innymi elementami konstrukcyjnymi takimi jak: stężenia, płatwie, rygle ścienne.
Jednak w celu wyznaczenia przybliżonych wartości sił wewnętrznych w ustrojach poprzecznych słupowo – ryglowych wyizolowuje się je z przestrzennej pracy hali, nadaje się im właściwe schematy statyczne i stosowne obciążenia pionowe i poziome. Przykłady, najczęściej projektowanych schematów, statycznych hal parterowych, lekkich pokazano na rys. 7.2a, b.

Z szkieletu przestrzennego hali wydzielić można układ poprzeczno – słupowych o schemacie jak pokazano na rys. 8.14.



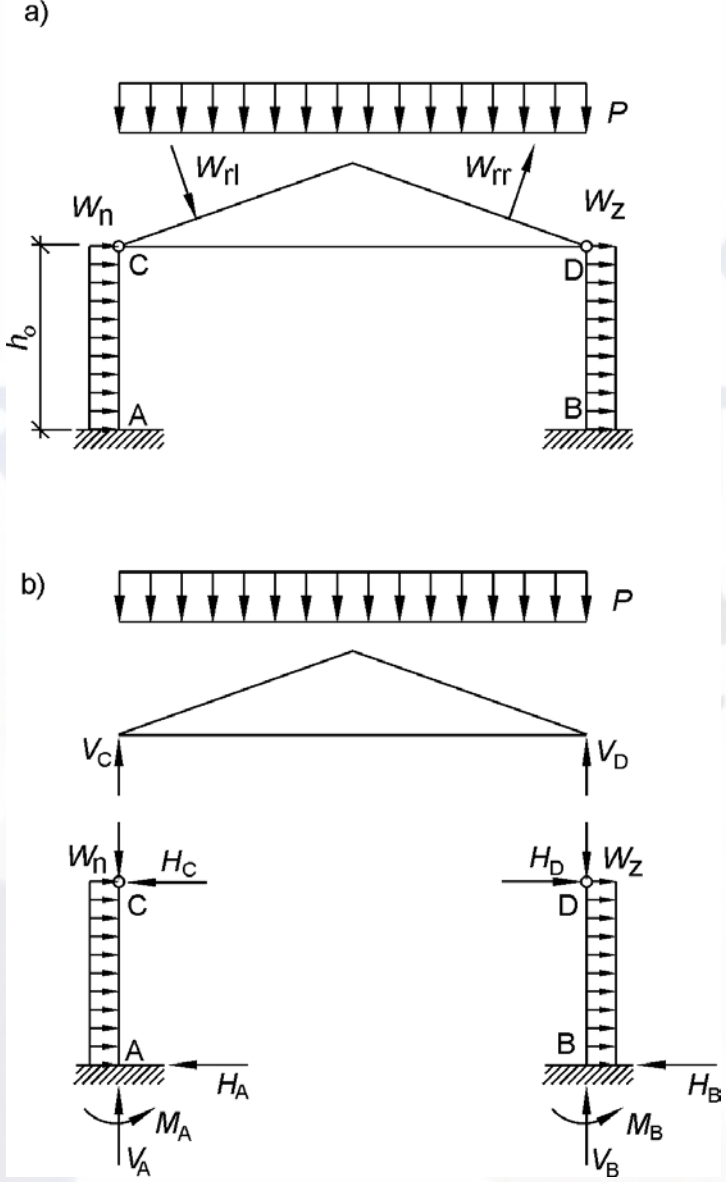
Rys. 8.14. Przybliżone określanie sił i momentów podporowych ram portalowych

8.6.4. Wielkości podporowe układów poprzecznych o przegubowym połączeniu rygla ze słupami

Od obciążeń stałych, śniegu działających na wiązar kratowy, siły w prętach oblicza się jak dla ustroju swobodnie podpartego, a reakcjami pionowymi obciąża się słupy podpierające ten dźwigar (rys. 8.18b). Przy działaniu sił poziomych zakłada się, że rygiel jest nieskończenie sztywny i można oddzielić go od słupów i obciążyć siłami jak na rys. 8.18b.

Reakcje poziome H_C i H_D, które są wielkościami nadliczbowymi ustroju jednokrotnie statycznie niewyznaczalnymi można obliczyć wg wzoru:

$$H_C = -H_D = \frac{3}{16}\left(W_n - W_z\right) h_c + \frac{W_{rl,H} - W_{rr,H}}{2}. \qquad (8.17)$$



Rys. 8.18. Schemat statyczny i obciążenie układu poprzecznego z ryglem trójkątnym połączonym przegubowo ze słupami

Jan Żmuda

PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH

cz.1 Dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice

Dziękuję za uwagę.