

Konstrukcje metalowe

Wykład VI

Imperfekcje

Spis treści

Wprowadzenie → #t / 3

Imperfekcje materiałowe → #t / 11

Imperfekcje geometryczne i wymagania techniczne → #t / 34

Klasy wykonania → #t / 47

Obliczenia → #t / 59

Przykład → #t / 85

Zagadnienia egzaminacyjne → #t / 97

Wprowadzenie



Photo: fishki.pl



Rys: fishki.pl



Rys: fishki.pl



Rys: fishki.pl

Rys: prikol.ru



Rys: hourdose.com



Imperfekcje w konstrukcjach stalowych w rzeczywistości nie są tak malownicze.

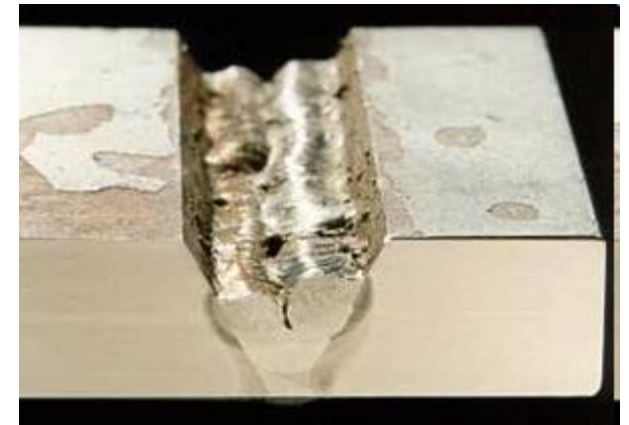


Rys: image.slidesharecdn.com

Rys: panama.uela.it



Rys: ccj-online.com



Rys: mig-welding.co.uk

Imperfekcja

Różnica pomiędzy modelem idealnym (idealna geometria, opis teoretyczny parametrów mechanicznych) – i konstrukcją rzeczywistą (rzeczywiste zachowanie się materiału, geometria nieidealna)



Rys: Autor

Trudno jest nawet ustalić różnicę między geometrią rzeczywistą a idealną

$h_I :$

524 mm

522 mm

523 mm

525 mm

524 mm

523 mm

524 mm

...

$b :$

198 mm

202 mm

199 mm

199 mm

200 mm

201 mm

200 mm

...

$t_f :$

11,6 mm

12,2 mm

11,8 mm

11,9 mm

12,0 mm

12,1 mm

11,9 mm

...

$t_w :$

2,88 mm

3,04 mm

3,13 mm

2,77 mm

2,90 mm

2,36 mm

2,48 mm

...

Pomiary tego samego elementu przy użyciu tego samego sprzętu, przeprowadzone przez różnych ludzi, mogą się znacznie różnić.

Nie unikniemy imperfekcji. W świecie realnym nie ma idealnych materiałów i konstrukcji.

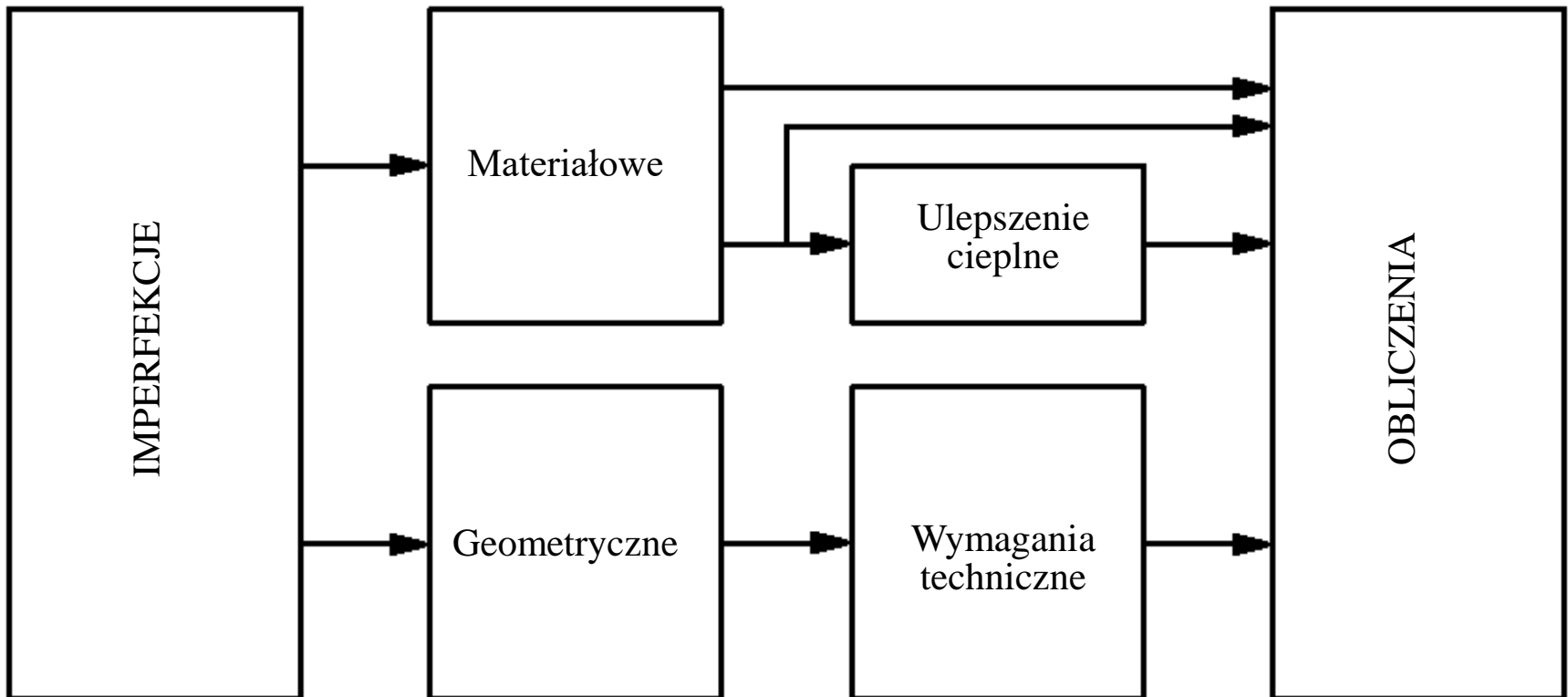
Imperfekcje pochodzą z mikrouszkodzeń materiału, niepewności modelu obliczeniowego i czynnika ludzkiego (błędy, pomyłki).

Część jest eliminowana dzięki wymogom technicznym i normom odbiorczym. Część likwiduje ulepszenie cieplne. Resztę musimy wziąć pod uwagę w procesie obliczeń.

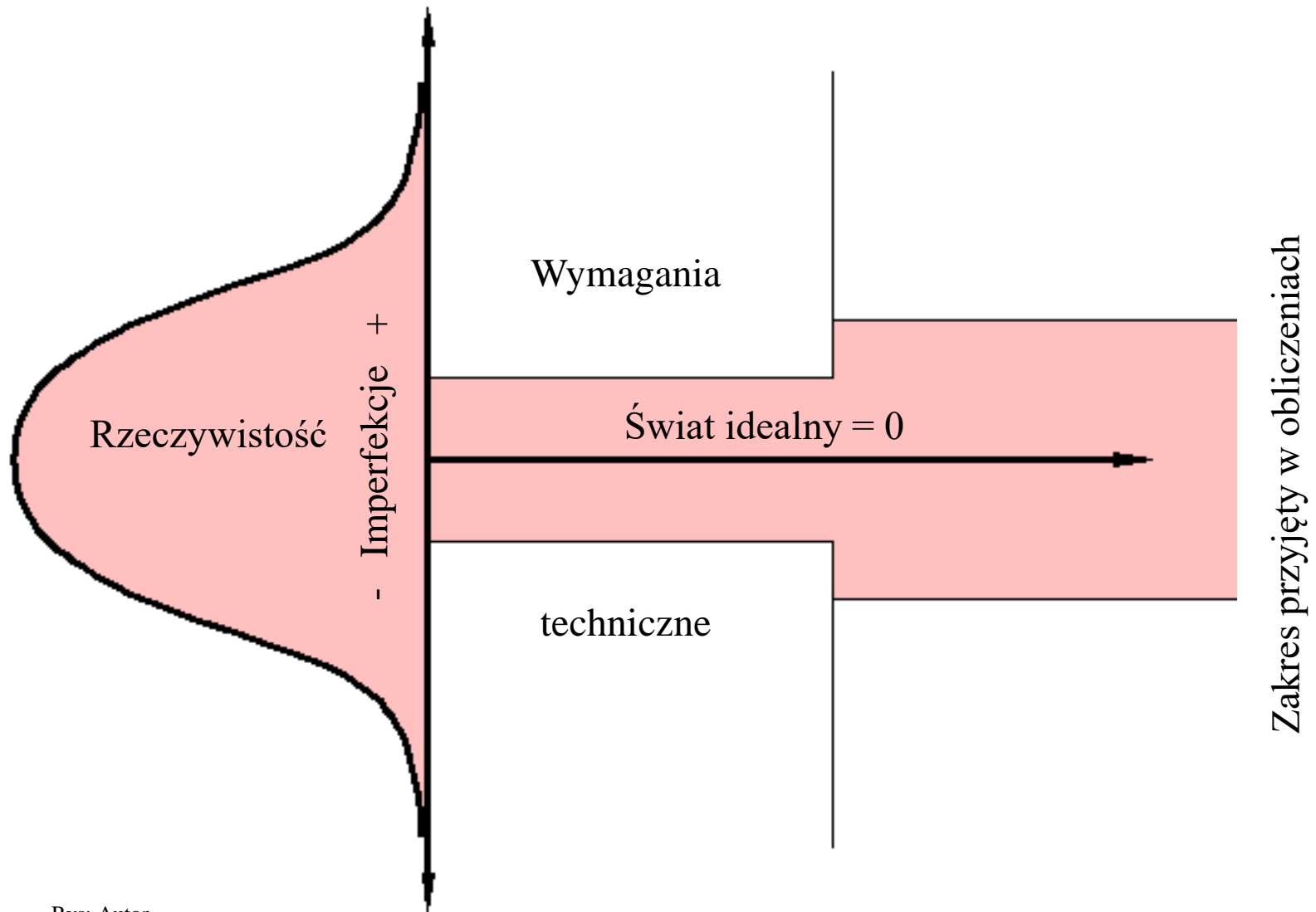
W procesie obliczeń przyjmujemy geometrię idealną (bez imperfekcji geometrycznych), idealny materiał (bez imperfekcji materiałowych) i dodatkowe schematy obciążenia, reprezentujące wpływ imperfekcji.

Imperfekcje można podzielić na dwie grupy:

- + materiałowe (mikrouszkodzenia, niepewność modelu)
- + geometryczne (deformacje spawalnicze, czynnik ludzki)



Rys: Autor



Rys: Autor

Imperfekcje materiałowe

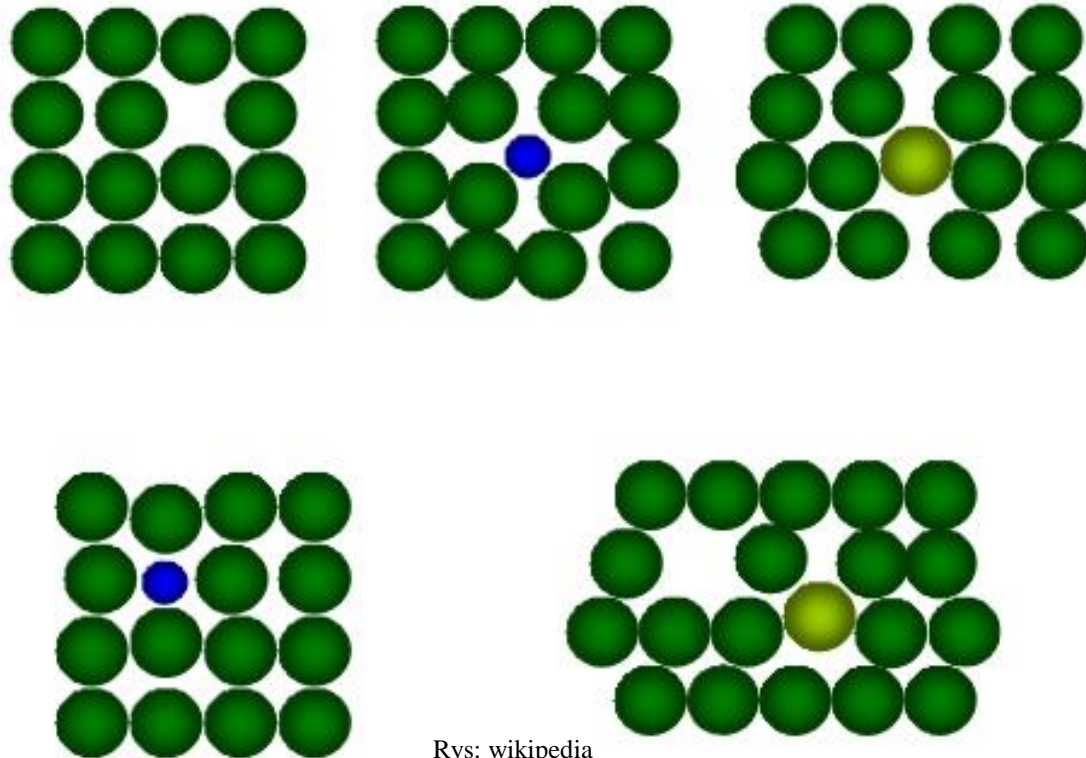
Analiza budowy wewnętrznej materiału

Imperfekcje materiałowe można podzielić na dwa rodzaje:

- Efekt naturalnych cech materiału;
- Wtórny efekt obróbki materiału (walcowanie na gorąca, cięcie na zimno, cięcie, wiercenie otworów...)

Naturalne cechy materiałów

1. Dla metali ważna jest struktura kryształiczna. Nie ma idealnych kryształów – czasem brak atomu, czasem „rozpycha się” inna substancja lub zajmuje miejsce materiału rodzimego. Wszystko to osłabia strukturę wewnętrzną i zmniejsza wytrzymałość materiału.



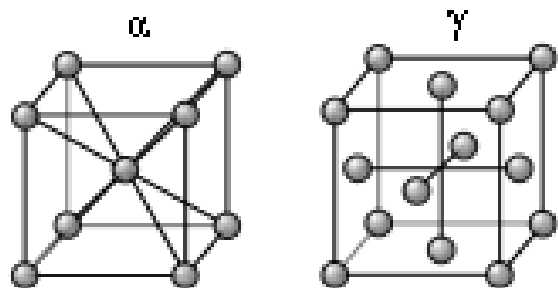
Rys: wikipedia

2. Kryształy rodzą się w przypadkowych miejscach i z osiami skierowanymi w przypadkowych kierunkach. Rozrastają się do momentu gdy sąsiednie kryształy zablokują ten proces. Mikrouszkodzenia koncentrują się na płaszczyznach pomiędzy kryształami.



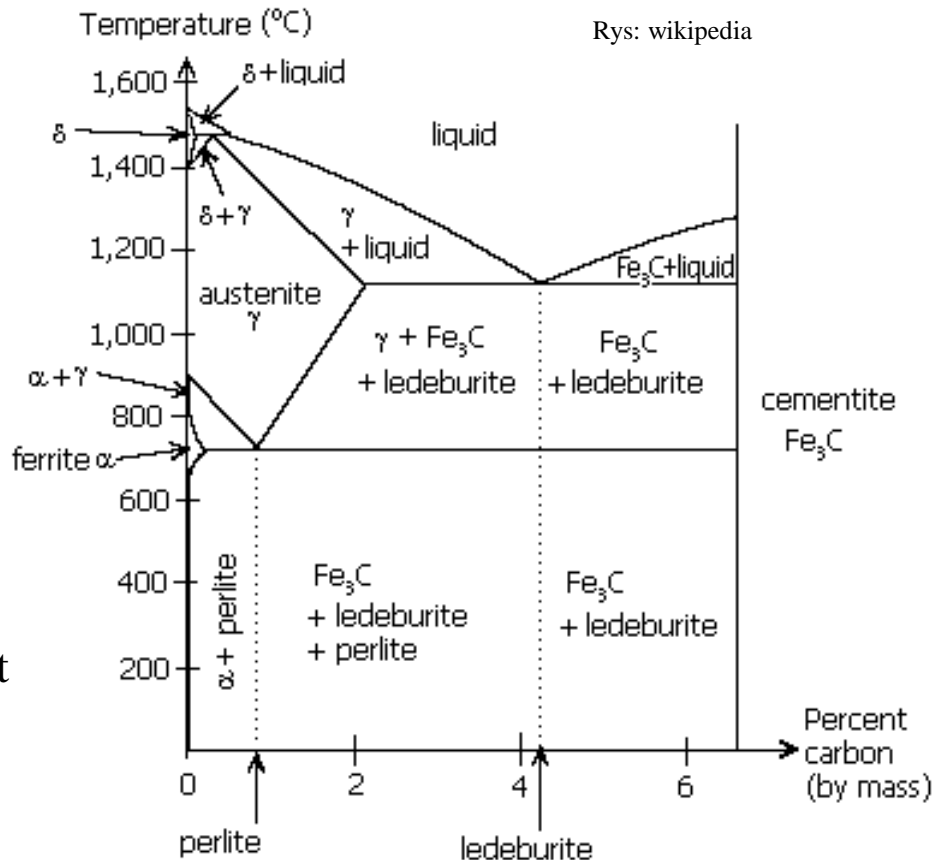
Rys: zasoby.open.agh.edu.pl

3. Stal składa się z żelaza i węgla – jako mieszaniny lub związku chemicznego. W dodatku mamy też różne rozmiary kryształów żelaza. Wszystko to powoduje powstanie kolejnych niejednorodności i imperfekcji



Rys: wikipedia

Feryt, austenit, cementyt, ledeburyt, perlit, martenzyt, bainit, sorbit, sferoidyt – różne odmiany alotropowe stali mają różne wartości charakterystyk materiałowych.



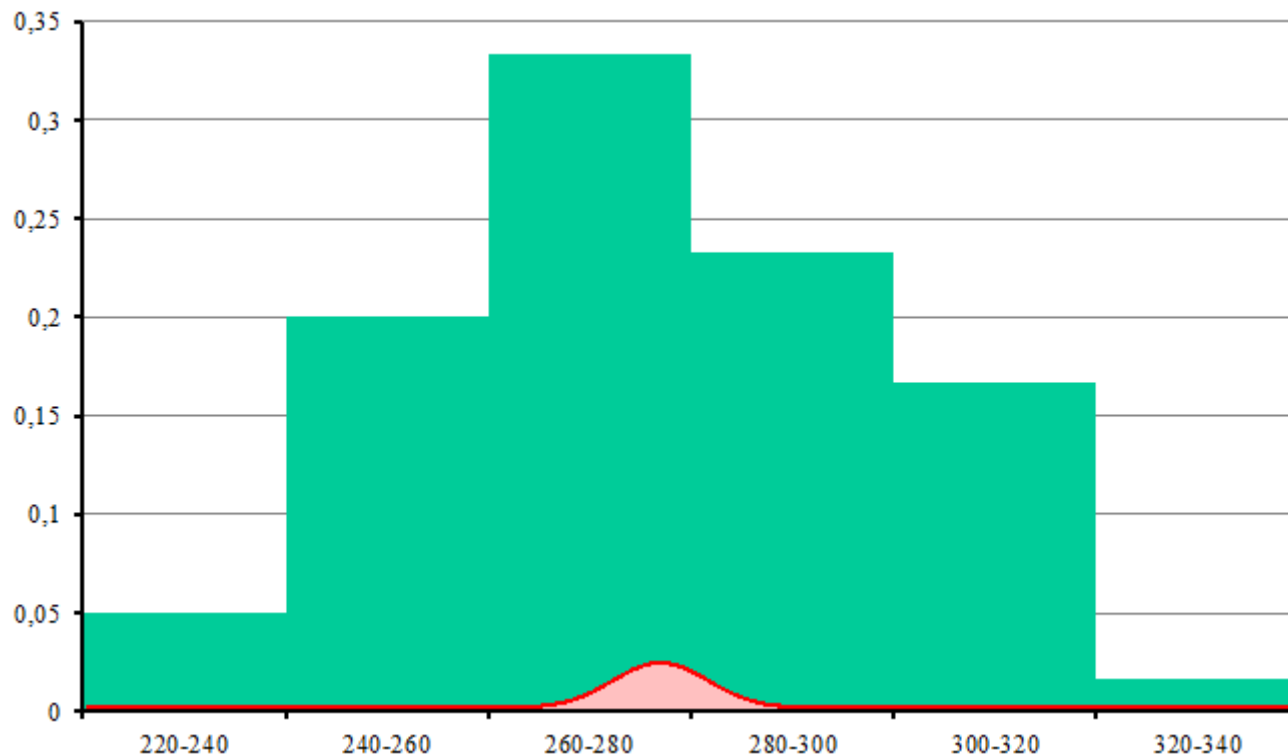
4. Zanieczyszczenia

Wewnątrz każdego gatunku stali zawarte są zanieczyszczenia (fosfor, siarka, gazy, reszki żuzla). Wszystko to ma destrukcyjny wpływ na materiał i parametry mechaniczne (korozja, mikropęknięcia).

S 235 JR [%]

C			Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N
t < 16 mm	16 < t < 40 mm	t > 40 mm			(max)	(max)					(max)
0,170	0,170	0,200	1,400	-	0,035	0,035	-	-	-	-	0,012

Różne próbki tej samej stali mają różną wytrzymałość.



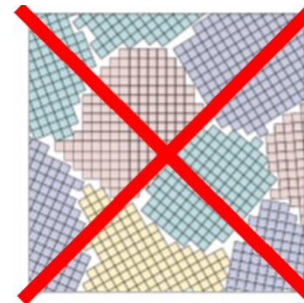
Rys: Autor

Wpływ mikroimperfekcji:

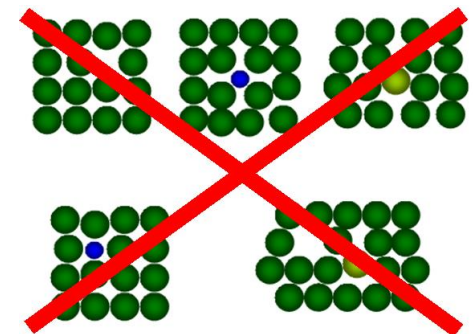
	f_y [MPa]	f_u [MPa]
„Zwykła” stal	235 – 355	360 – 470
Stal nierdzewna	210 – 480	380 – 660
Stal wysokiej wytrzymałości	500 – 700	590 – 750
Stal na ciągną		1 450 – 2 300
Monokryształ stali	~ 5 000	
Monokryształ bez defektów sieci atomowej (szacunkowo)	~ 18 000	



Rys: Autor

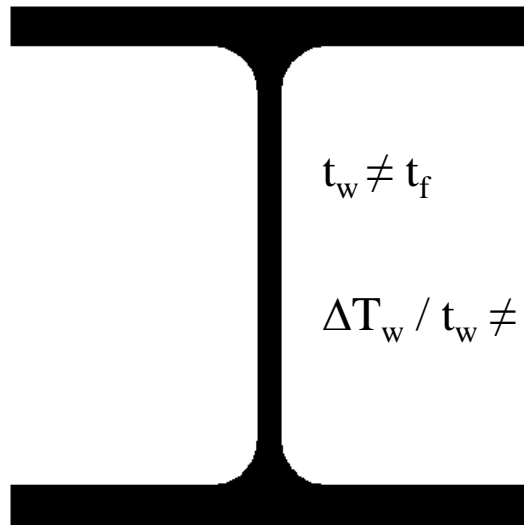


Rys: Autor



Wtórne efekty obróbki

1. Przekroje gorącowalcowane: płka i środnik mają różne grubości, ale walcowane są w tej samej temperaturze. Tempo spadku temperatury po walcowaniu jest szybsze dla cienkiego środnika niż dla grubej półki. W efekcie podczas stygnięcia pojawiają się różnice temperatury i naprężenia termiczne. Są to naprężenia resztkowe, które mają niezerową wartość nawet po całkowitym ostygnięciu elementu. Sumują się one z naprężeniami od obciążeń zewnętrznych, dając w efekcie inne wyężenie, niż wynika z obliczeń teoretycznych.



$$t_w \neq t_f$$

$$\Delta T_w / t_w \neq \Delta T_f / t_f \quad [^{\circ}\text{C/s}]$$



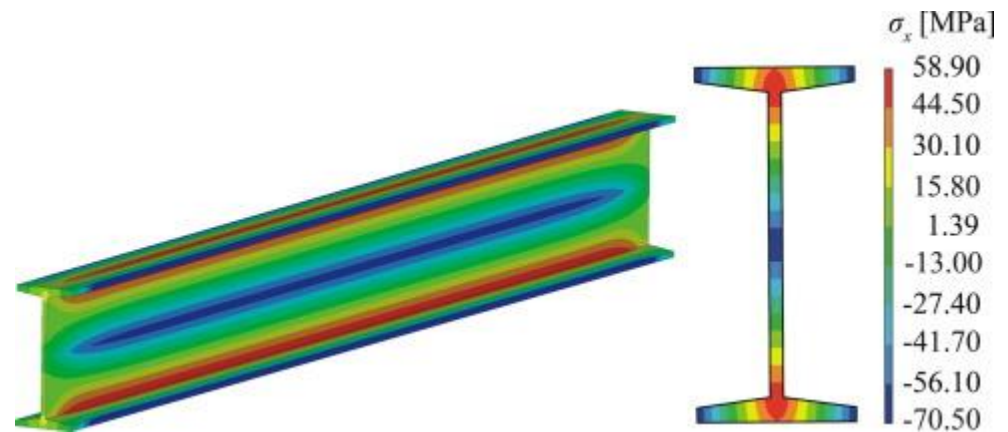
Rys: preetgroup.com

Rys: Autor



Rys: steelconstruction.info

Naprężenia resztkowe są samozrównoważone: każda wyliczona na ich podstawie siła przekroju (siła osiowa, moment zginający, siła ścinająca, moment skręcający) wynosi 0,00, ale ich lokalne wartości mogą być bardzo duże. Ich suma z naprężeniami od obciążeń może być lokalnie równą wytrzymałości materiału, nawet dla niewielkiej wartości obciążeń zewnętrznych. Zjawisko to może znacznie obniżyć wytrzymałość przekroju w porównaniu z teoretycznym założeniem o braku naprężeń w nieobciążonym elemencie.

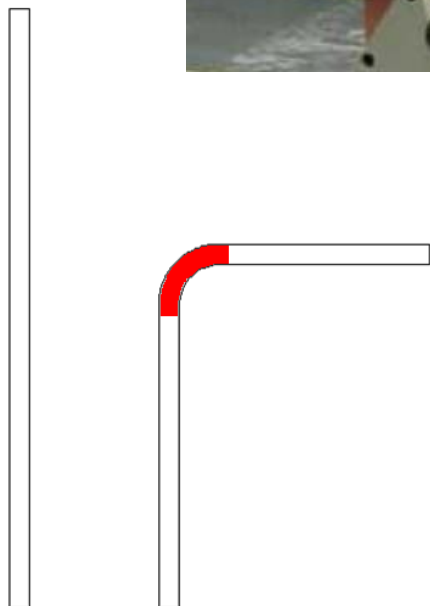


Rys: Global sensitivity analysis of lateral-torsional buckling resistance based on finite element simulations, Zdeněk Kala, Jan Valeš

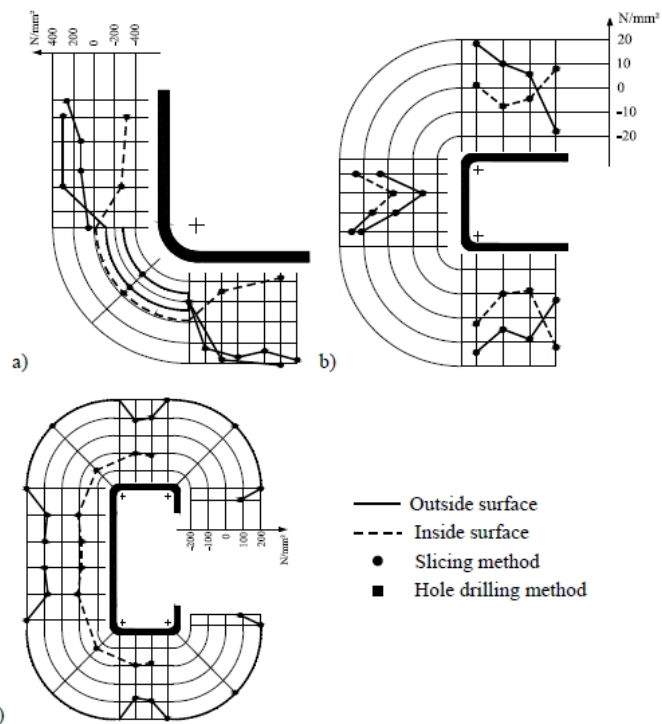
2. Niemal identyczna sytuacja występuje w przypadku przekrojów zimnogiętych. Powstają one przez deformacje plastyczne elementów (ich wygięcie „poza granicę plastyczności”). Także i tutaj pozostają istotne naprężenia resztkowe.



Rys: cieceplazma.pl



Rys: Autor



Rys: Design of cold-formed steel structures, D. Dubina, V. Ungureanu, R. Landolfo

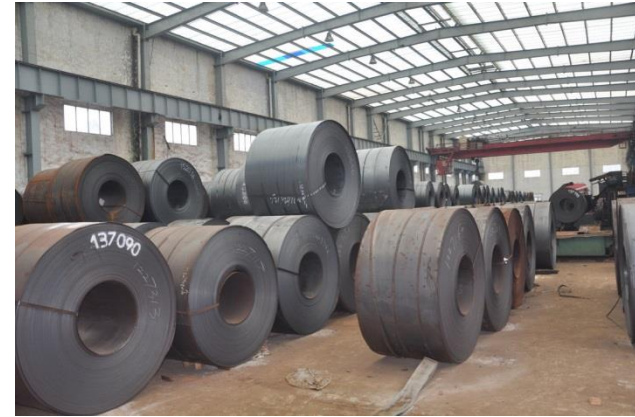
Płaskie wyroby walcowane:

Bednarka ($t = 1-5 \text{ mm}$; $s = 20-85 \text{ mm}$)



Rys: steelstrap.en.ecplaza.net

Blacha w zwojach



Rys: threadedstainlesssteelpipe.com

Płaskownik ($t = 6-55 \text{ mm}$; $s = 20-150 \text{ mm}$)



→ #1 / 76

Rys: corten.com

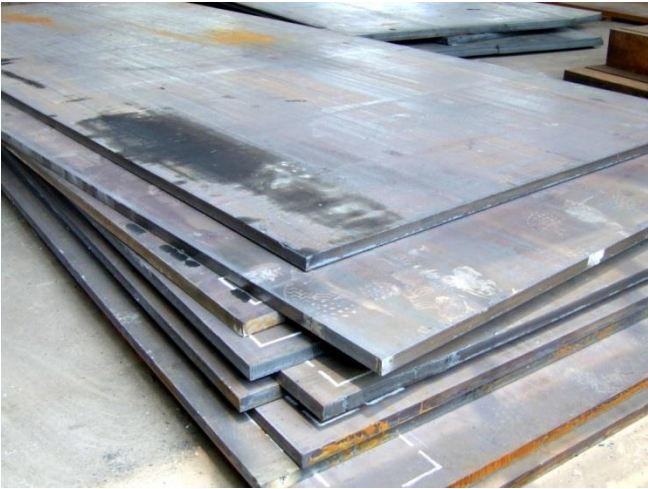
Blacha w arkuszach



Rys: corten.com

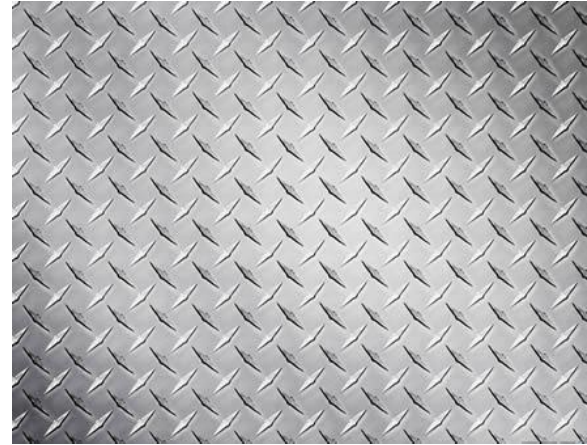
Blacha w arkuszach:

Płaska



Rys: corten.com

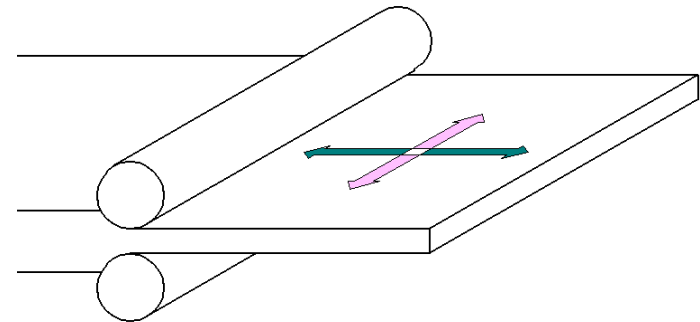
Żeberkowa



Rys: checker-plate.com

Blacha płaska: → #1 / 77

- cięta ze zwojów;
- walcowana w jednym kierunku;
- walcowana dwukierunkowo (blacha uniwersalna).



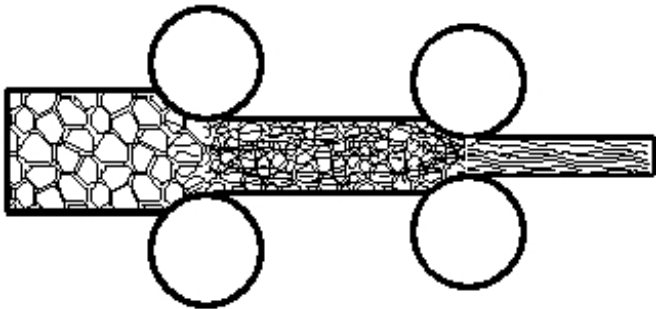
Rys: Autor

3. Blacha z rulonu musi być rozprostowana. W efekcie mamy plastyczne deformacje i naprężenia resztkowe w arkuszu.

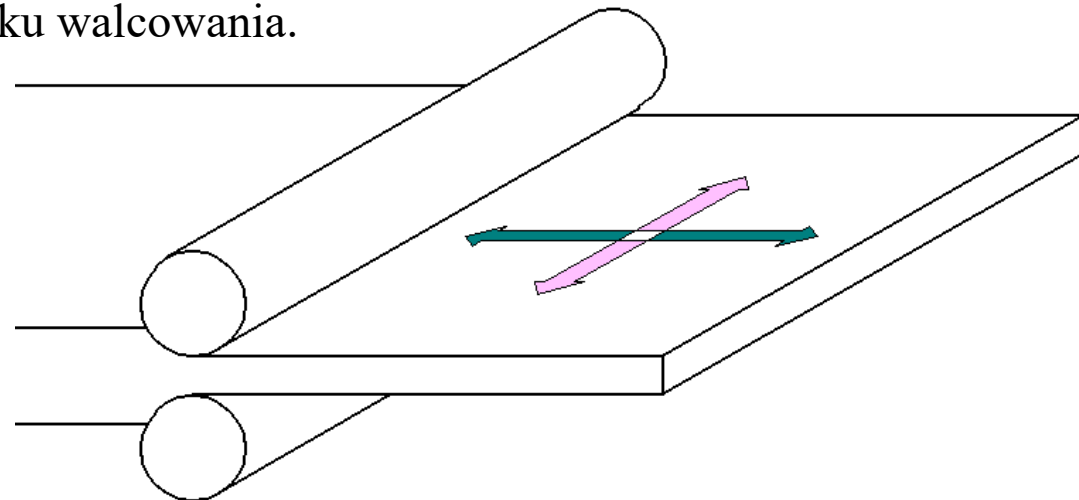


Rys: threadedstainlesssteelpipe.com

4. Podczas walcowania dochodzi do trwałej deformacji kryształów żelaza. Deformacja ta przebiega zgodnie z kierunkiem walcowania. W efekcie powstaje zauważalna różnica parametrów mechanicznych arkusza w kierunku równoległym i prostopadłym do kierunku walcowania.

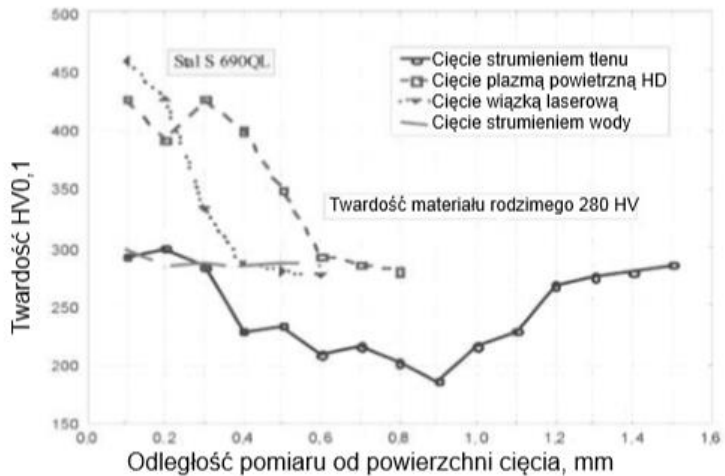
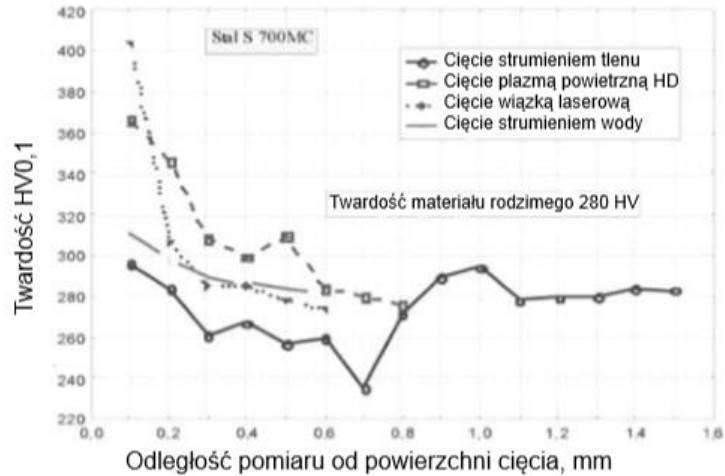


Rys: paws.wcu.edu



Rys: Autor

5. Każdy rodzaj cięcia i wiercenia lokalnie zmienia cechy wytrzymałościowe materiału.



Rys: Wpływ procesów cięcia termicznego i strumieniem wody na właściwości i jakość powierzchni ciętych stali niskostopowych o wysokiej granicy plastyczności, Górka J. Skiba R.

Twardość w funkcji odległości między analizowanym punktem i krawędzią blachy stalowej do cięcia tlenem, plazmą, laserem i strumieniem wody; stal S 700 i S 690. Lokalny wzrost twardości (i kruchości) jest efektem lokalnego odkształcenia kryształów podczas cięcia.



Rys: bth.pl



Rys: cieceplazma.pl



Rys: sukces-zamocowania.pl



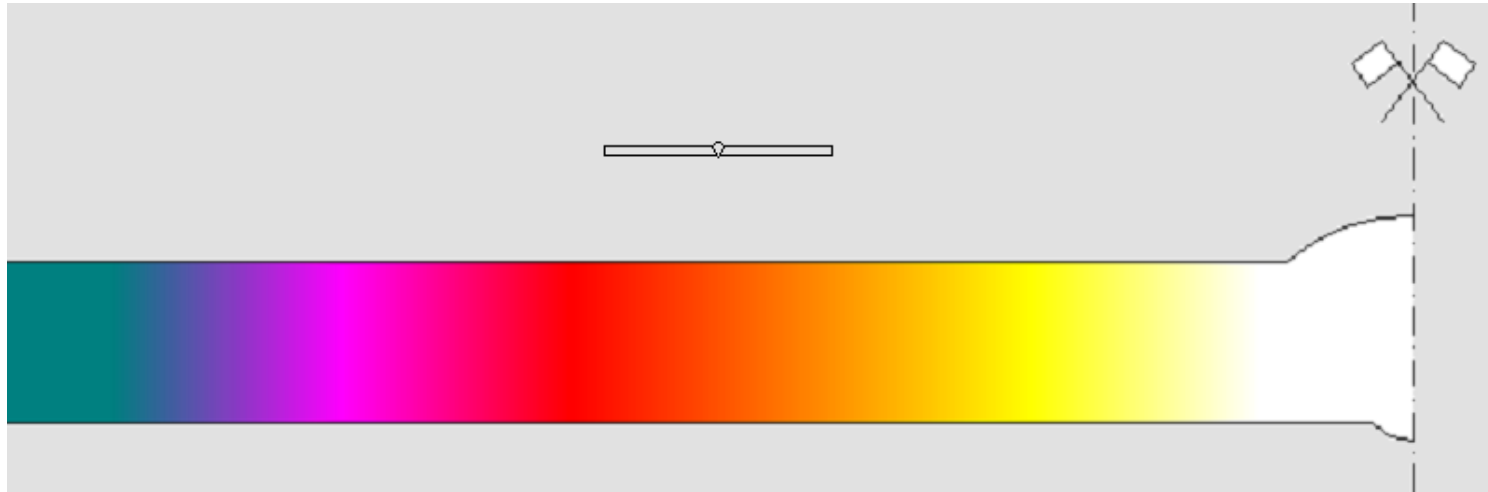
Początkowe odkształcenia podczas cięcia (rodzaj odkształcenia plastycznego) blachy stalowej - kolejny efekt lokalnych odkształceń kryształów.



Rys: ndt.net

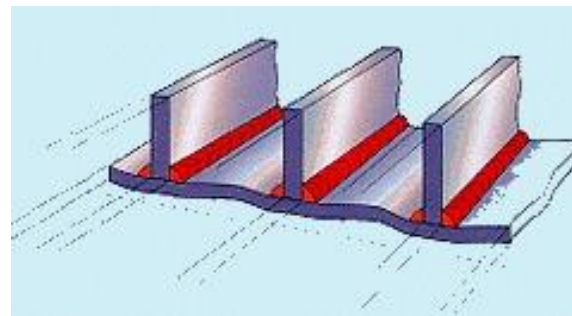
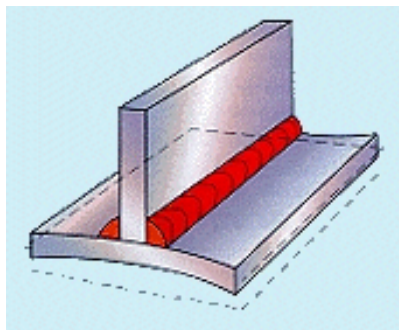
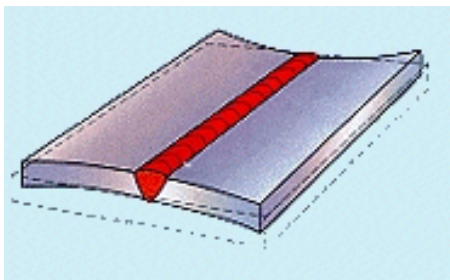
Stal utwardzona jest bardzo podatna na kruche pękanie. Każdy element na wszystkich krawędziach cięć lub wierceń ma pewną liczbę mikropełnięć.

6. Elementy spawane: w różnych punktach mamy różne temperatury; w dodatku sytuacja zmienia się w czasie (rozgrzanie – spawanie – stygnięcie). Tu także pojawiają się niezerowe naprężenia resztkowe.



Rys: Autor

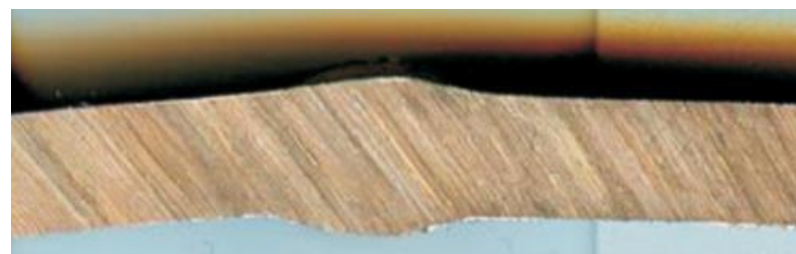
7. Dodatkowym efektem spawania są deformacje spawalnicze w wyniku naprężeń resztkowych po spawaniu. Tego rodzaju naprężenia i odkształcenia zostaną przedstawione na wykładzie #16.



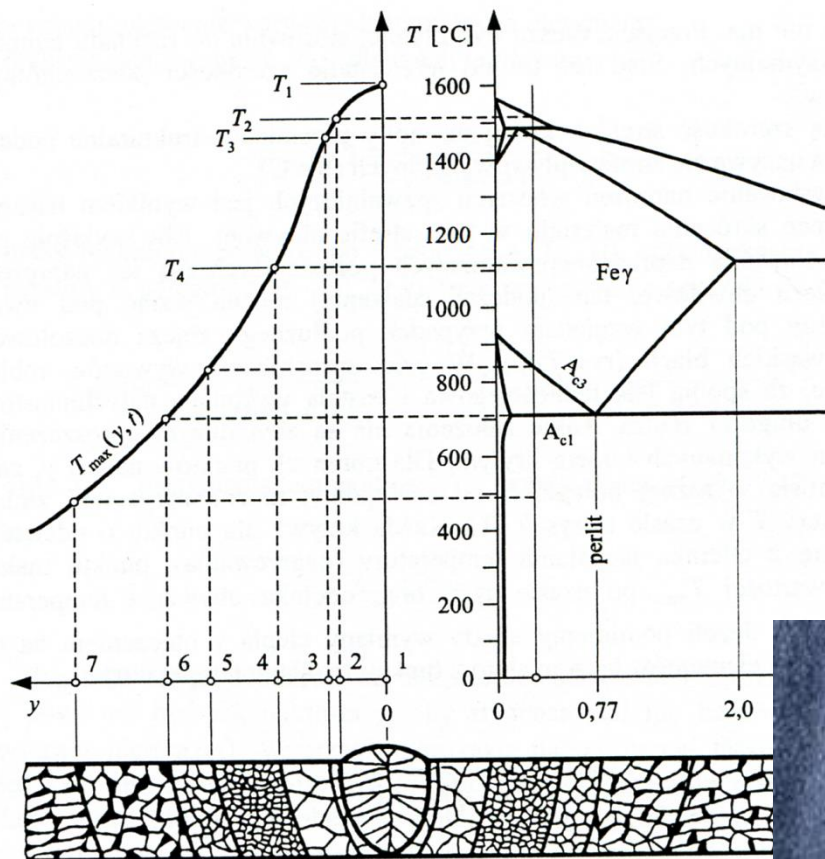
Rys: congnghehan.vn



Rys: researchgate.net

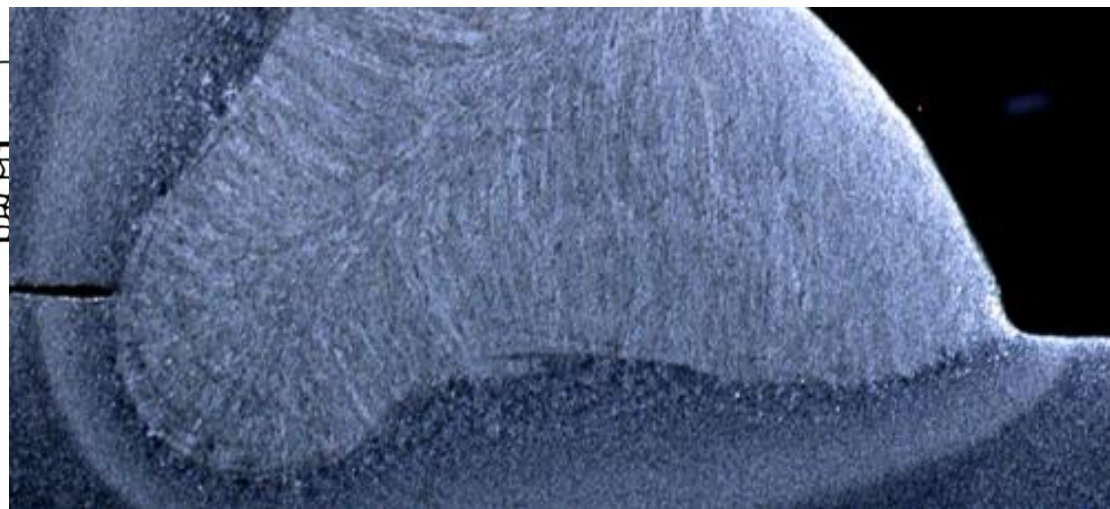


Rys: Analiza numeryczna odkształcenia i naprężenia w strefie złącza spawanego rurociągu przemysłowego, Gliha V Śniezek L Zimmerman J, Biuletyn WAT Vol. LVIII, No. 2, 2009



Rys: Konstrukcje stalowe, K. Rykaluk,
Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne
Wrocław 2001

8. Efektem ubocznym lokalnego przetopu materiału jest proces rekrytalizacji. Powoduje to lokalne zmiany parametrów mechanicznych materiału.



Rys: struers.com

9. Ostatni powód imperfekcji podczas spawania: zanieczyszczenia wtórne i mikrouszkodzenia powstałe podczas spawania. To jest powód największej liczby imperfekcji.



Imperfekcje spawalnicze dominują liczebnie w stosunku do wszystkich innych imperfekcji związanych z obróbką materiału.

Rys: manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org

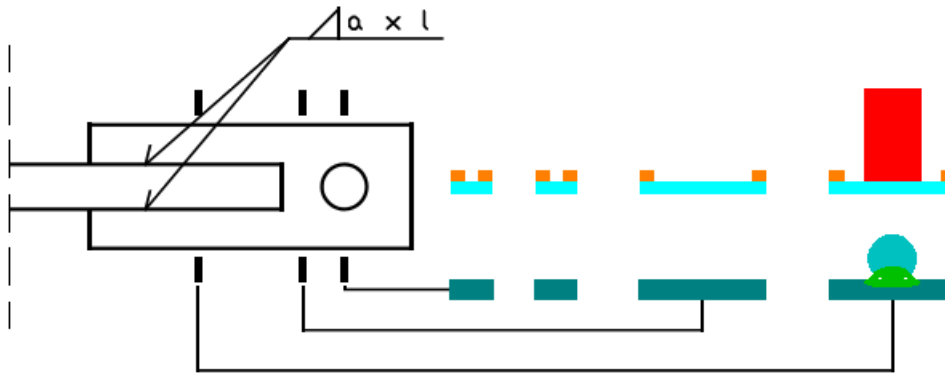


Rys: scottmetals.com.au

Pręt stężenia z blachą węzłową



Rys: Autor



Rys: Autor

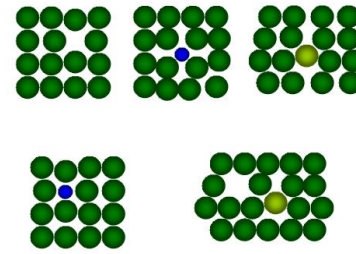
Oszacowanie średniej ilości imperfekcji w przekroju blachy:

„zwykłe” imperfekcje wewnętrzne w blasze

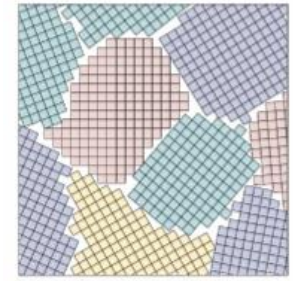
efekt obróbki (cięcie blachy, wykonanie otworów...)

efekt spawania

Imperfekcje wewnętrzne w blasze (#t / 12 - 17)

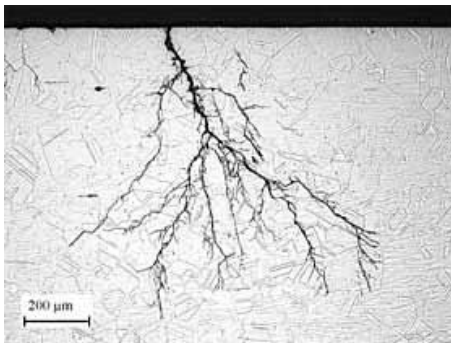


Rys: wikipedia



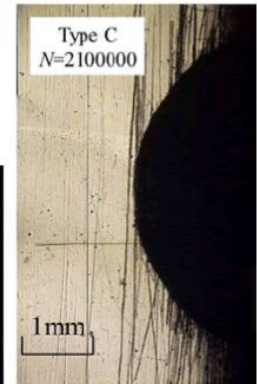
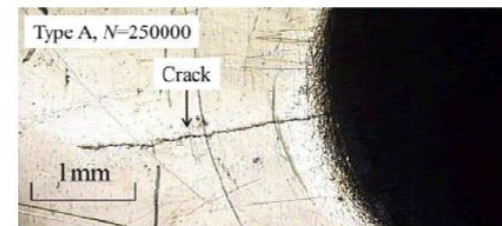
Rys: zasoby.open.agh.edu.pl

Dodatkowe imperfekcje związane z obróbką mechaniczną (#t / 18 – 25): odkształcenia plastyczne, lokalne utwardzenie (deformacja kryształów), lokalne pękanie (twardość $\uparrow \rightarrow$ kruchość $\uparrow \rightarrow$ udarność \downarrow) – zjawiska brane pod uwagę przy analizie zmęczeniowej (więcej informacji Wyk #16).

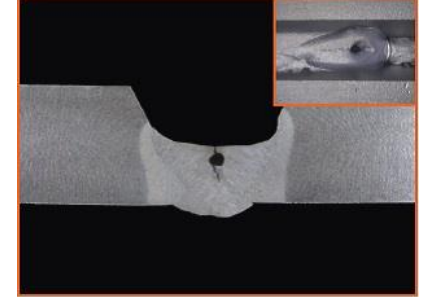
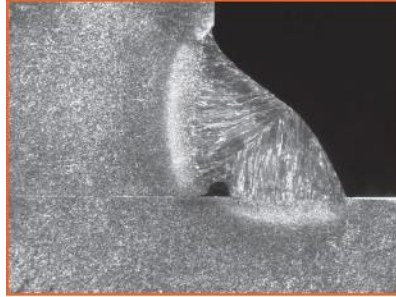


Rys: twi-global.com

Rys: omicsonline.org



Imperfekcje spawalnicze (#t / 26-29): wtórne zanieczyszczenia (pęcherzyki gazu, wtrącenia żużlu) wprowadzone do spoiny, lokalne odkształcenia, pękanie na skutek naprężeń termicznych...



Rys: figel.pl

Doświadczenie i samopoczucie spawacza ↓ → ilość imperfekcji spawalniczych ↑ → jakość spoiny ↓

Imperfekcje spawalnicze także bierze się pod uwagę przy obliczeniach zmęczeniowych (więcej informacji Wyk #16). Dodatkowo, akceptowalny poziom imperfekcji jest ustalany przez klasy wykonania (→ #t / 47). Spoiny nie spełniające poziomu jakości muszą być usunięte i wykonane ponownie.

Wyżarzanie – podgrzanie elementu do wysokiej temperatury, utrzymanie jej przez kilkanaście godzin, bardzo wolne ochłodzenie;

- ◆ Wyżarzanie ujednorodniające: jednorodna struktura wewnętrzna (chemiczna i krystaliczna), ujednorodnienie cech wytrzymałościowych w całej objętości materiału;
- ◆ Wyżarzanie normalizujące: rozdrobnienie struktury krystalicznej, wzrost wytrzymałości;
- ◆ Wyżarzanie rekrytalizujące: redukcja naprężeń resztkowych

Hartowanie – podgrzanie elementu do wysokiej temperatury, utrzymanie jej przez kilkanaście godzin, błyskawiczne ochłodzenie: zwiększenie twardości i kruchości

Odpuszczanie – podgrzanie elementu do wysokiej temperatury, utrzymanie jej przez kilkanaście godzin, bardzo wolne ochłodzenie;

- ◆ Odpuszczanie wysokie: wysoka wytrzymałość, obniżenie twardości;
- ◆ Odpuszczanie średnie: wysoka wytrzymałość, wysoka plastyczność, obniżenie twardości;
- ◆ Odpuszczanie niskie: redukcja naprężeń resztkowych po hartowaniu, redukcja kruchości, podniesienie twardości

Więcej informacji → wyk. #2

Imperfekcje geometryczne i wymagania techniczne

Jak duże wartości imperfekcji są dopuszczalne?

EN 1090 Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych:

1090-1 Zasady oceny zgodności elementów konstrukcyjnych

1090-2 Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych

1090-3 Wymagania techniczne dotyczące wykonania konstrukcji aluminiowych

Zgodnie z EN 1090, imperfekcje geometryczne dzielone są jak następuje:

	Wytwarzania	Montażu
Podstawowe	S.G.N.	S.G.N.
Funkcjonalne	S.G.U. (klasa 1, klasa 2)	S.G.U. (klasa 1, klasa 2)

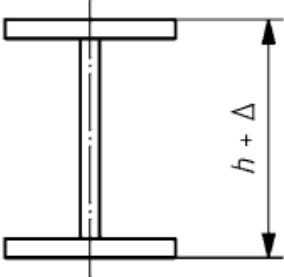
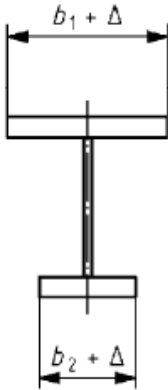
Wytwarzania – powstają głównie na hali montażowej;

Montażu – powstają głównie na placu budowy;

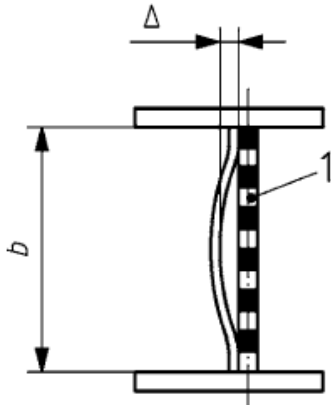
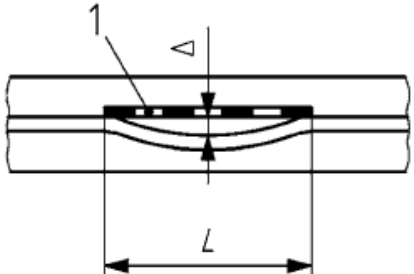
Podstawowe – podstawowe;

Funkcjonalne – wymagania dodatkowe; unikanie niedokładności w węzłach, względy estetyczne

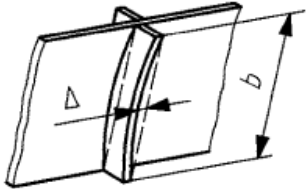
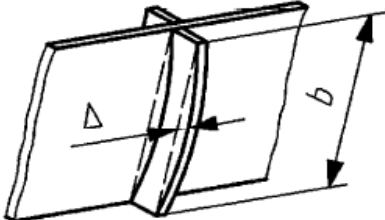
Przykłady podstawowych wytwarzania EN 1090-2 tab. D.1.1

Nr	Kryterium	Parametr	Dopuszczalna odchyłka Δ
1	<p>Wysokość:</p> 	Wysokość kształtownika h :	$\Delta = -h/50$ <p>(nie określa się dopuszczalnej odchyłki dodatniej)</p>
2	<p>Szerokość pasa:</p> 	Szerokość $b = b_1$ lub b_2 :	$\Delta = -b/100$ <p>(nie określa się dopuszczalnej odchyłki dodatniej)</p>

EN 1090-2 tab. D.1.1

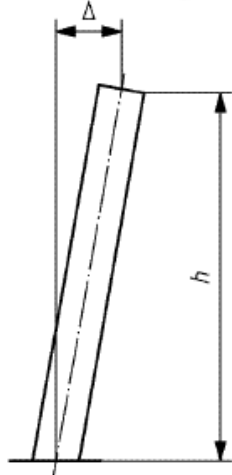
4	<p>Płaskość środnika:</p> 	<p>Strzałka wygięcia Δ na wysokości środnika b:</p>	$\Delta = \pm b/100$ <p>lecz $\Delta \geq t$ (t = grubość blachy)</p>
5	<p>Płaskość środnika – wgniecenia:</p> 	<p>Strzałka wgniecenia Δ na długości bazowej L równej wysokości b:</p>	$\Delta = \pm b/100$ <p>lecz $\Delta \geq t$ (t = grubość blachy)</p>

EN 1090-2 tab. D.1.5

Nr	Kryterium	Parametr	Dopuszczalna odchyłka Δ
1	Prostoliniowość żebra w płaszczyźnie środka: 	Strzałka wygięcia Δ w kierunku równoległym do środka:	$\Delta = \pm b/250$ lecz $ \Delta \geq 4 \text{ mm}$
2	Prostoliniowość żebra w kierunku prostopadłym do środka: 	Strzałka wygięcia Δ w kierunku prostopadłym do środka:	$\Delta = \pm b/500$ lecz $ \Delta \geq 4 \text{ mm}$

EN 1090-2 tab. D.1.11

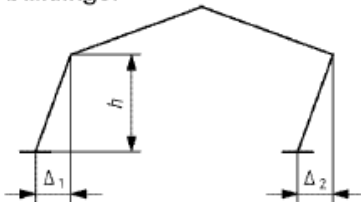
Inclination of columns of single storey buildings



Overall inclination in storey height h :

$$\Delta = \pm h/300$$

Inclination of single storey columns in portal frame buildings:



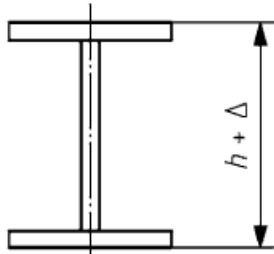
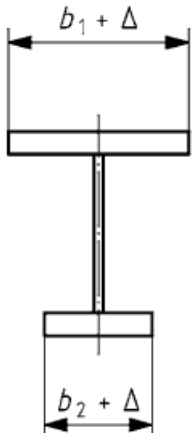
Mean inclination of all the columns in the same frame:

[For two columns:

$$\Delta = (\Delta_1 + \Delta_2)/2]$$

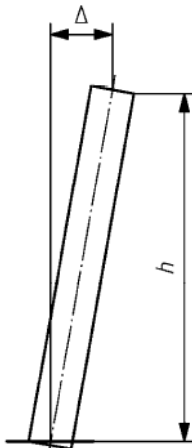
$$\Delta = \pm h/500$$

Przykłady funkcjonalnych wytwarzania EN 1090-2 tab. D.2.1

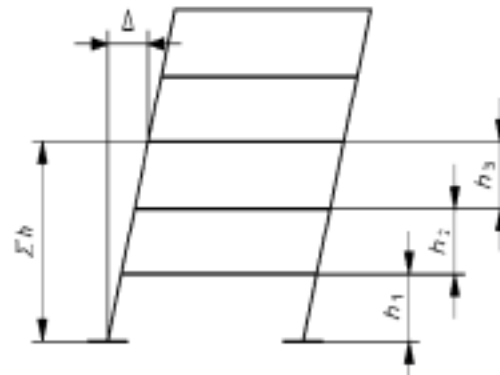
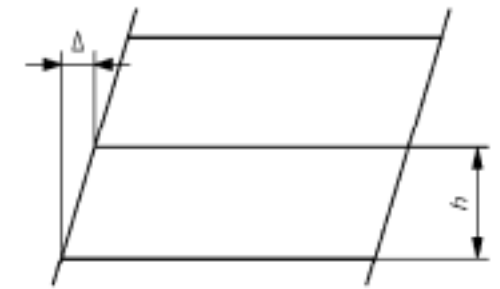
Nr	Kryterium	Parametr	Dopuszczalna odchyłka Δ	
			Klasa 1	Klasa 2
1	<p>Wysokość:</p> 	<p>Wysokość gabarytowa h:</p> <p>$h \leq 900$ mm $900 < h \leq 1\ 800$ mm $h > 1\ 800$ mm</p>	<p>$\Delta = \pm 3$ mm $\Delta = \pm h/300$ $\Delta = \pm 6$ mm</p>	<p>$\Delta = \pm 2$ mm $\Delta = \pm h/450$ $\Delta = \pm 4$ mm</p>
2	<p>Szerokość pasa:</p> 	<p>Szerokość b_1 lub b_2</p>	<p>$+\Delta = b/100$ lecz $\Delta \geq 3$ mm</p>	<p>$+\Delta = b/100$ lecz $\Delta \geq 2$ mm</p>

Przykłady funkcjonalnych montażu

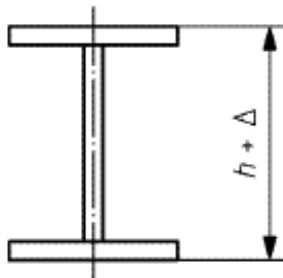
EN 1090-2 tab. D.2.23

Nr	Kryterium	Parametr	Dopuszczalna odchyłka Δ	
			Klasa 1	Klasa 2
1	<p>Pochylenie słupów jednokondygnacyjnych – ogólnie:</p> 	<p>Wzajemne przesunięcie Δ końców słupa o wysokości h:</p>	$\Delta = \pm h/300$	$\Delta = \pm h/500$
2	<p>Pochylenie poszczególnych słupów w ramach portalowych:</p> 	<p>Wzajemne przesunięcie Δ końców każdego słupa: $\Delta = \Delta_1$ lub Δ_2</p>	$\Delta = \pm h/150$	$\Delta = \pm h/300$

Rys: EN 1090-2 tab. D.2.24

<p>Pochylenie słupa wielokondygnacyjnego:</p> 	<p>Przesunięcie Δ węzła na rozpatrywanym poziomie względem podstawy słupa: n – liczba kondygnacji.</p>	$ \Delta = \Sigma h / (300\sqrt{n})$	$ \Delta = \Sigma h / (500\sqrt{n})$
<p>Pochylenie słupa między sąsiednimi stropami:</p> 	<p>Wzajemne przesunięcie Δ końców odcinka słupa w ramach jednej kondygnacji</p>	$\Delta = \pm h / 500$	$\Delta = \pm h / 1\ 000$

Rys: Autor



Przykład

$h = 800 \text{ mm}$

	Klasa	Δ	Wytwarzania	Montażu
Podstawowe	Brak odniesienia	+	0 mm	Brak odniesienia
		-	$h / 50 = 16 \text{ mm}$	
Funkcjonalne	1	+	3 mm	
		-	3 mm	
	2	+	2 mm	
		-	2 mm	

Wnioski: +0mm, -2 mm lub -3 mm w zależności od klasy

Wymiary w milimetrach

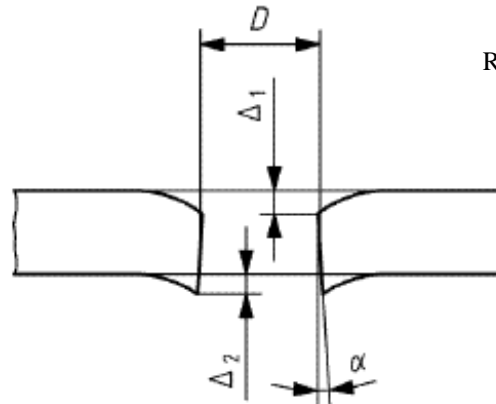
Gwint (d)				M1,6	M2	M2,5	M3	M4
P ^a				0,35	0,4	0,45	0,5	0,7
(b)	b			9	10	11	12	14
	c			15	16	17	18	20
	d			28	29	30	31	33
d _s	nom. = max			1,60	2,00	2,50	3,00	4,00
	Klasa dokładności	A	min.	1,46	1,86	2,36	2,86	3,82
				B	1,35	1,75	2,25	2,75
e	Klasa dokładności	A	min.	3,41	4,32	5,45	6,01	7,66
				B	3,28	4,18	5,31	5,88
k	nom.			1,1	1,4	1,7	2	2,8
	Klasa dokładności	A	max	1,225	1,525	1,825	2,125	2,925
			min.	0,975	1,275	1,575	1,875	2,675
	Klasa dokładności	B	max	1,3	1,6	1,9	2,2	3,0
			min.	0,9	1,2	1,5	1,8	2,6
	s	nom. = max			3,20	4,00	5,00	5,50
Klasa dokładności		A	min.	3,02	3,82	4,82	5,32	6,78
				B	2,90	3,70	4,70	5,20

Wymiary śrub podlegają innym normom. Minimalne i maksymalne dopuszczalne wymiary podano na przykład w tabelach projektowych.

Klasa dokładności					l _s i l _g ^{a, f}												
A		B			l _s		l _g		l _s		l _g		l _s		l _g		
nom.	min.	max	min.	max	min.	max	min.	max	min.	max	min.	max	min.	max	min.	max	
12	11,65	12,35	-	-	1,2	3											Powyżej grubości stosowanie €
16	15,65	16,35	-	-	5,2	7	4	6	2,75	5							
20	19,58	20,42	18,95	21,05			8	10	6,75	9	5,5	8					
25	24,58	25,42	23,95	26,05					11,75	14	10,5	13	7,5	11			
30	29,58	30,42	28,95	31,05							15,5	18	12,5	16			
35	34,5	35,5	33,75	36,25									17,5	21			
40	39,5	40,5	38,75	41,25									22,5	26			
45	44,5	45,5	43,75	46,25													
50	49,5	50,5	48,75	51,25													
55	54,4	55,6	53,5	56,5													
60	59,4	60,6	58,5	61,5													
65	64,4	65,6	63,5	66,5													
70	69,4	70,6	68,5	71,5													

Rys: Tablice do projektowania konstrukcji metalowych, W. Bogucki, M. Żybertowicz

Imperfekcje na skutek wiercenia otworów dla śrub:



Rys: EN 1090-2 fig. 1.

$$D = (d_{\min} + d_{\max}) / 2$$

$$\max (\Delta_1 ; \Delta_2) \leq \max (D / 10 ; 1 \text{ mm})$$

$$\alpha \leq 4^\circ = 7\%$$

EN 1993-1-1 2.4.2 (1)

2.4.1 Wartości obliczeniowe właściwości materiału

(1)P W projektowaniu konstrukcji stalowych przyjmuje się wartości charakterystyczne X_k lub wartości nominalne X_n właściwości materiału, zgodnie ze wskazaniami tego Eurokodu.

Jeżeli imperfekcje geometryczne nie przekraczają wartości dopuszczalnych, do obliczeń przyjmuje się wymiary nominalne (zakładane w projekcie).

Klasy wykonania

Istnieją dwie klasy imperfekcji funkcjonalnych geometrycznych. Zależą od klasy wykonania EXC (EXecution Class).

Jak określić typ klasy wykonania?

Klasa konsekwencji		CC1		CC2		CC3	
Kategoria użytkowania		SC1	SC2	SC1	SC2	SC1	SC2
Kategoria produkcji	PC1	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3	EXC3
	PC2	EXC2	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3	EXC4
Klasy imperfekcji		1			2		

EN 1090-2 tab B.3

Jeśli nie mamy dokładnych danych, przyjmujemy EXC2.

Klasy konsekwencji – krótko- i długookresowe skutki zniszczenia konstrukcji



I



II



III



Rys: wikipedia

→ #3 / 31

Klasa	Opis	Przykład
CC3	Wysokie zagrożenie ludzkiego życia lub bardzo duże konsekwencje społeczne, ekonomiczne i środowiskowe	Widownie, budynki użyteczności publicznej, których konsekwencje zniszczenia są wysokie
CC2	Przeciętne zagrożenie ludzkiego życia lub znaczne konsekwencje społeczne, ekonomiczne i środowiskowe	Budynki mieszkalne i biurowe oraz budynki użyteczności publicznej, których konsekwencje zniszczenia są przeciętne
CC1	Niskie zagrożenie ludzkiego życia lub małe lub nieznaczne konsekwencje społeczne, ekonomiczne i środowiskowe	Budynki rolnicze w których ludzie zazwyczaj nie przebywają oraz szklarnie

→ #3 / 32

EN 1990 tab B1

Nadzór w trakcie projektowania i wykonania; EN 1990, tab. B1 + B4 + B5

Klasa konsekwencji	Poziom nadzoru przy projektowaniu	Charakterystyka	Minimalne zalecenia	Poziom inspekcji (przy wykonaniu)	Charakterystyka	Wymagania
CC3	DSL3	Nadzór zaostrowany	Sprawdzenie przez stronę trzecią (inną jednostkę projektową)	IL3	Inspekcja zaostrowana	Inspekcja przez stronę trzecią
CC2	DSL2	Nadzór normalny	Sprawdzenie wg procedur jednostki projektowej	IL2	Inspekcja normalna	Inspekcja wg procedur jednostki wykonawczej
CC1	DSL1	Nadzór normalny	Autokontrola (przez autora projektu)	IL1	Inspekcja normalna	Autoinspekcja

→ #3 / 37

Kategoria produkcji (Production Categories): EN 1090-2 tab. B.2

Kategoria	Kryteria
PC1	<ul style="list-style-type: none">◆ Elementy niespawane wykonywane ze stali dowolnego gatunku;◆ Elementy spawane wykonane ze stali gatunków niższych niż S355;
PC2	<ul style="list-style-type: none">◆ Elementy spawane wykonane ze stali gatunku S355 i wyższych;◆ Elementy kluczowe dla integralności konstrukcji scalane za pomocą spawania na terenie budowy;◆ Elementy formowane na gorąco lub poddawane obróbce termicznej podczas wytwarzania;◆ Elementy dźwigarów kratowych z rur okrągłych CHS, które wymagają profilowania końcówek

Kategoria użytkowania (Service Categories): EN 1090-2 tab. B.1

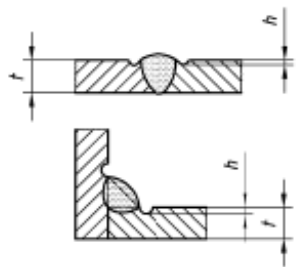
Kategoria	Kryteria
SC1	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Konstrukcje i elementy projektowane na oddziaływania przeważająco statyczne, np. budynki); ◆ Konstrukcje, elementy i połączenia projektowane na oddziaływania sejsmiczne w rejonach niskiej aktywności sejsmicznej, gdy wymagane jest niska klasa ciągliwości DCL*; ◆ Konstrukcje i elementy projektowane na oddziaływanie zmęczeniowe od dźwignic klasy S_0**;
SC2	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Konstrukcje i elementy projektowane na oddziaływania zmęczeniowe wg EN 1993 (np. mosty drogowe i kolejowe, dźwignice klasy od S_1 do S_9, konstrukcje wrażliwe na drgania wywołane wiatrem, tłumem lub maszynami wirnikowymi); ◆ Konstrukcje, elementy i połączenia projektowane na oddziaływanie sejsmiczne w rejonach średniej i wysokiej aktywności sejsmicznej, gdy wymagana jest średnia lub wysoka klasa ciągliwości DCM* lub DCH*;

* DCL, DCM, DCH: klasy ciągliwości zgodnie z EN 1998-1;

** Klasyfikacja wpływów zmęczeniowych od dźwignic zgodnie z EN 1991-3 oraz EN 13 001-1

Klasy wykonania są ważne dla jakości spoin (EN 1090-2 7.6)

Klasa wykonania	Kryteria akceptacji (poziom jakości)
EXC1	D
EXC2	C (ogólnie) D (podtopienie, nawis, ślad zajarzenia, pęcherz kanalikowy w kraterze)
EXC3	B
EXC4	B+

Nr	Powołanie na ISO 6520-1	Oznaczenie niezgodności spawalniczej	Komentarze	t mm	Wartości graniczne niezgodności spawalniczych dla poziomów jakości		
					D	C	B
1	2	3	4	5	6	7	8
1.7	5011 5012	Podtopienie ciągle Podtopienie przerywane	Wymagane jest łagodne przejście. Nie jest to traktowane jako niezgodność spawalnicza systematyczna.	od 0,5 do 3 > 3	Niezgodności spawalnicze krótkie: $h \leq 0,2 t$	Niezgodności spawalnicze krótkie: $h \leq 0,1 t$	Nie dopuszcza się $h \leq 0,05 t$, ale max 0,5 mm
							

EN ISO 5817 tab. 1 – dopuszczane wartości imperfekcji dla różnych poziomów jakości

Tablica 17 – Dodatkowe wymagania związane z poziomem jakości B+

Oznaczenie niezgodności		Ograniczenie niezgodności ^a
Podtopienie (5011, 5012)		niedopuszczalne
Pęcherze i pory (2011 do 2014)	Spoiny czołowe	$d \leq 0,1 s$, lecz max 2 mm
	Spoiny pachwinowe	$d \leq 0,1 a$, lecz max 2 mm
Wtrącenia stałe (300)	Spoiny czołowe	$h \leq 0,1 s$, lecz max 1 mm $l \leq s$, lecz max 10 mm
	Spoiny pachwinowe	$h \leq 0,1 a$, lecz max 1 mm $l \leq a$, lecz max 10 mm
Przesunięcie brzegów (507)		$h < 0,05 t$, lecz max 2 mm
Wklęśnięcie grani (515)		niedopuszczalne
Wymagania dodatkowe dotyczące płyt pomostowych w mostach ^{a b}		
Pęcherze i pory (2011-2012)		Akceptowalne tylko pory pojedyncze

EN 1090-2 tab. 17 – wymogi dodatkowe dla B+

Tablica 24 – Zakres dodatkowych badań NDT

Rodzaj spoin	Spoiny warsztatowe lub montażowe		
	EXC2	EXC3	EXC4
Poprzeczne rozciągane spoiny czołowe z pełnym i niepełnym przetopem: $U \geq 0,5$ $U < 0,5$	10 % 0 %	20 % 10 %	100 % 50 %
Poprzeczne spoiny czołowe z pełnym i niepełnym przetopem: w złączach krzyżowych w złączach T	10 % 5 %	20 % 10 %	100 % 50 %
Poprzeczne spoiny pachwinowe rozciągane lub ścinane: gdy $a > 12$ mm lub $t > 20$ mm gdy $a \leq 12$ mm i $t \leq 20$ mm	5 % 0 %	10 % 5 %	20 % 10 %
Spoiny podłużne i spoiny do usztywnień (żeber)	0 %	5 %	10 %
<p>UWAGA 1 Spoinami podłużnymi są spoiny równoległe do osi elementów. Wszystkie pozostałe spoiny traktowane są jako poprzeczne.</p> <p>UWAGA 2 U = Stopień wykorzystania nośności spoiny przy oddziaływaniach przeważająco statycznych. $U = E_d/R_d$, gdzie E_d – największy efekt oddziaływania R_d – nośność spoiny.</p> <p>UWAGA 3 Oznaczenia a i t odnoszą się odpowiednio do grubości spoiny i grubości najcieńszej z łączonych części.</p>			

EN 1090-2 tab. 24 – Zakres badań nieniszczących (non-destructive tests, NDT), na przykład prześwietlenie rentgenem.

Dla dobrze wykonanych spoin poziom imperfekcji musi być < dopuszczalny limit. Jeśli limity nie są dotrzymane, spoiny muszą być usunięte i wykonane ponownie.

Podsumowując: konstrukcje bardziej odpowiedzialne (wyższa CC) wymagają większego zapasu bezpieczeństwa przy projektowaniu, dokładniejszego nadzoru nad projektowaniem i dokładniejszego nadzoru nad wznoszeniem.

Z kolei konstrukcje „kłopotliwe” (wyższa EXC):

z powodu spawania na montażu, zastosowania stali wysokiej wytrzymałości czy specyficznego sposobu obróbki przy wykonaniu (wyższa PC),

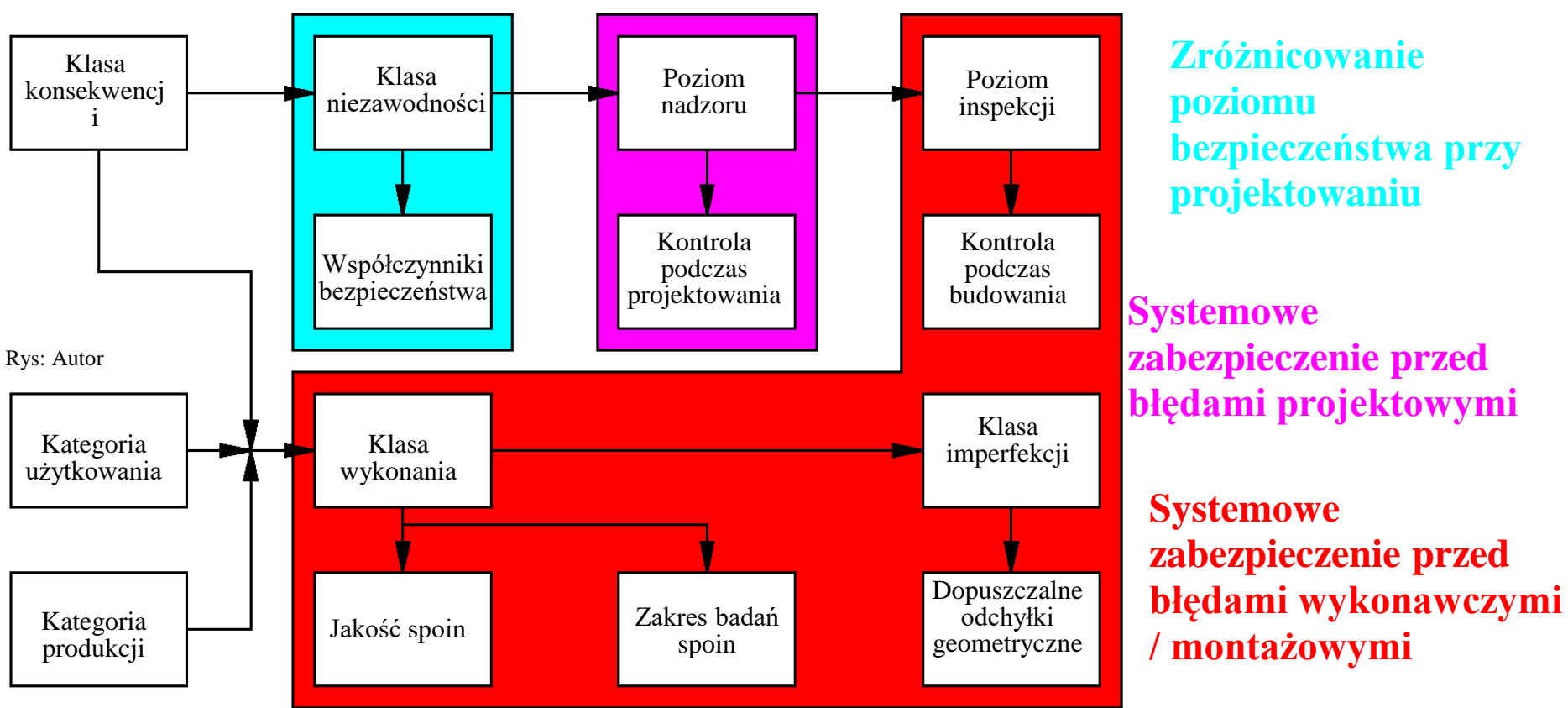
lub

istotnej wartości obciążeń dynamicznych (wyższa SC)

lub

bardziej odpowiedzialne (wyższa CC)

wymagają dokładniejszego wykonania: mają niższe wartości akceptowalnych imperfekcji wykonawczych, wymagają wyższej jakości spoin i większego zakresu kontroli ich wykonania.



Systemowe zabezpieczenie przed błędami i imperfekcjami obejmuje projektowanie, wykonanie elementów i ich montaż. Dla bardziej odpowiedzialnej konstrukcji (CC ↑ SC ↑ PC ↑) konieczna jest wysoka jakość spoin, małe imperfekcje geometryczne i szczegółowy nadzór nad projektem i montażem.

Spoiny o zbyt niskiej jakości lub elementy o zbyt dużych imperfekcjach muszą zostać usunięte i ponownie wykonane.

Obliczenia

Imperfekcje są uwzględniane na wiele różnych sposobów podczas projektowania. Ogólnie: analizujemy idealną geometrię, idealny materiał i wpływ imperfekcji za pomocą jednej z kilku metod.

Metody te można podzielić w następujący sposób:

- ogólne zasady projektowania i montażu oparte na doświadczeniach wielu pokoleń inżynierów;
- dodatkowe parametry opisujące wpływ imperfekcji na materiał;
- pośrednie uwzględnienie imperfekcji w obliczeniach;
- obciążenia zastępcze wynikające z imperfekcji, uwzględniane w obliczeniach.

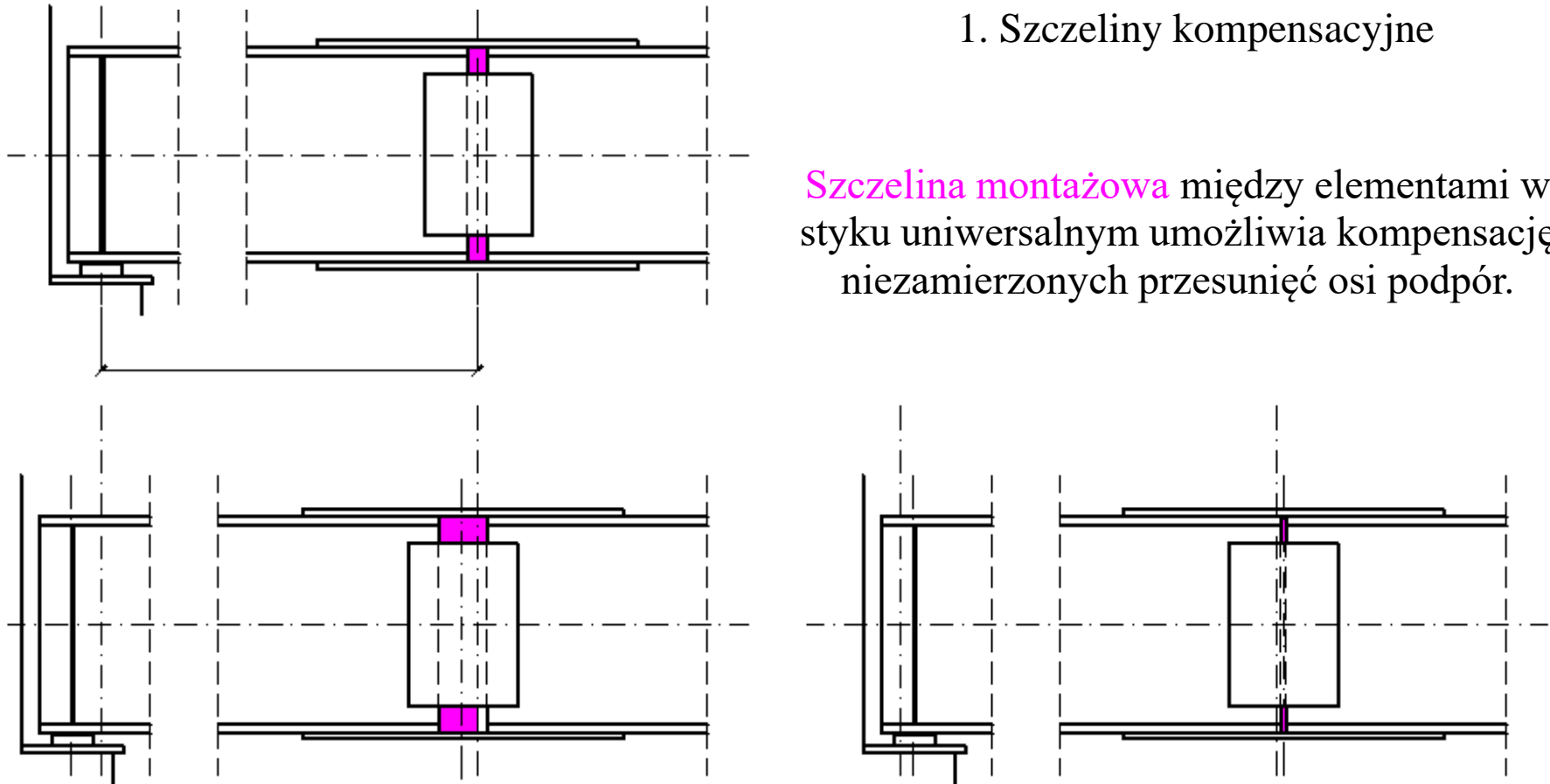
Obciążenia zastępcze opierają się na geometrii konstrukcji i siłach przekrojowych w elementach. Siły przekrojowe są obliczane z uwzględnieniem współczynników bezpieczeństwa γ dla obciążeń. Dlatego siły zastępcze nie muszą być ponownie mnożone przez współczynniki γ .

Ogólne metody wymiarowania (wybrane przykłady)

1. Szczeliny kompensacyjne

Szczelina montażowa między elementami w styku uniwersalnym umożliwia kompensację niezamierzonych przesunięć osi podpór.

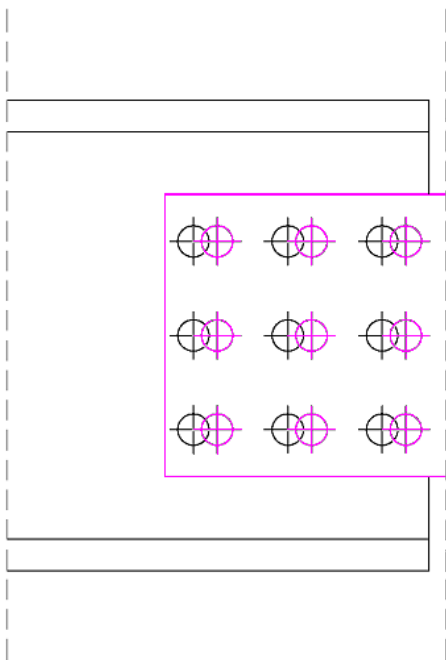
Teoretyczna odległość
między osiami



Rys: Autor

Efektym kompensacji będzie wzajemne przesunięcie się otworów w dwuteowniku i blachach.

Aby tego uniknąć, stosujemy otwory owalne.



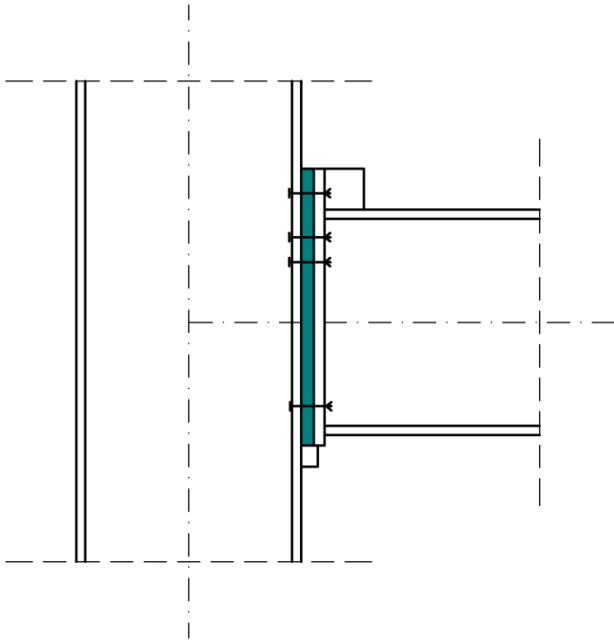
Rys: Autor



Rys: tekla-detailed-structural-fabrication.com

Otwory okrągłe powiększone i otwory owalne nie są zalecane dla śrub sprężających. Lepszym rozwiązaniem jest wykonywanie w blachach otworów na placu montażu, po uwzględnieniu przesunięć elementów.

2. Węzły doczołowe



Rys: Autor

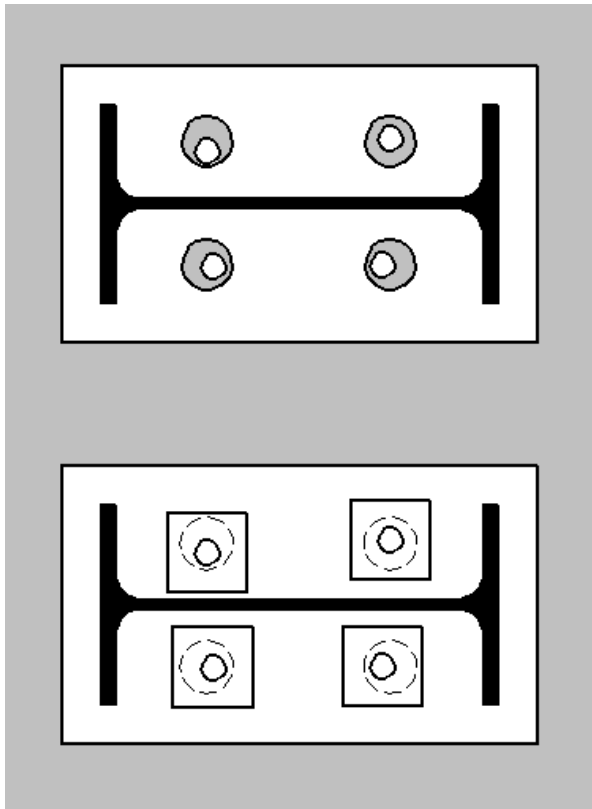


Rys: uwo.edu

Belki należy wykonać nieco krótsze, niż teoretyczna odległość między słupami. Różnice długości kompensujemy przekładkami, wykonanymi na placu budowy.

3. Stopy słupów

Dokładność wykonania konstrukcji stalowych - do 1 mm. Dokładność wykonania konstrukcji betonowych (również dla położenia śrub kotwiących) - do 10 mm. Średnica otworów dla śrub musi być bardzo duża, aby umożliwić kompensację imperfekcji położenia śrub kotwiących.



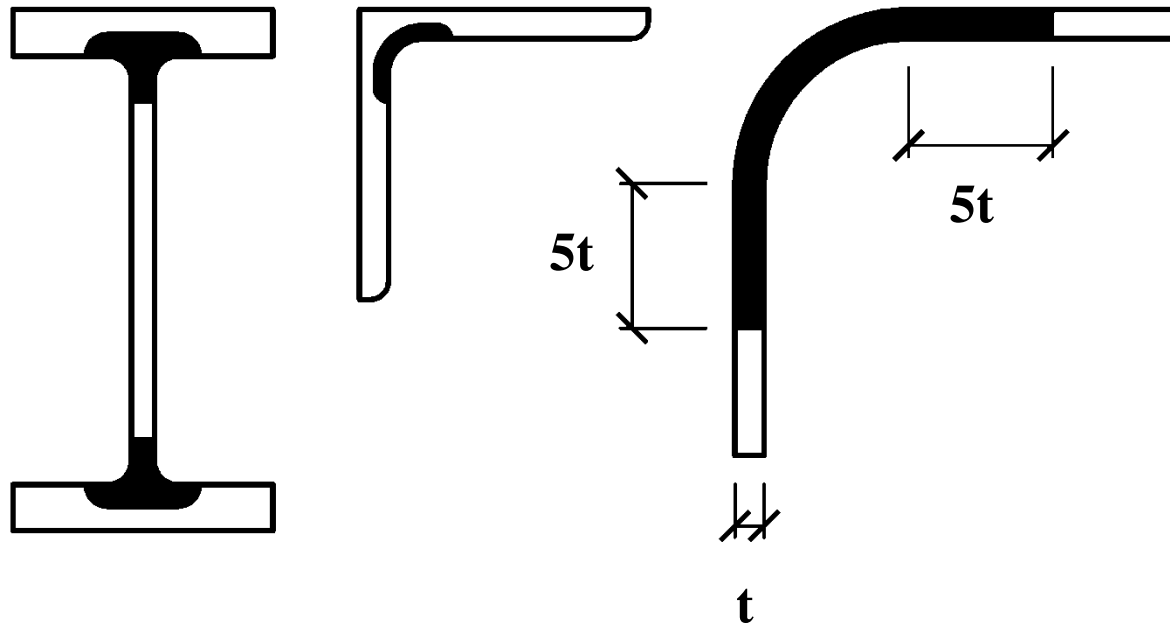
Rys: Autor



Rys: nees.org

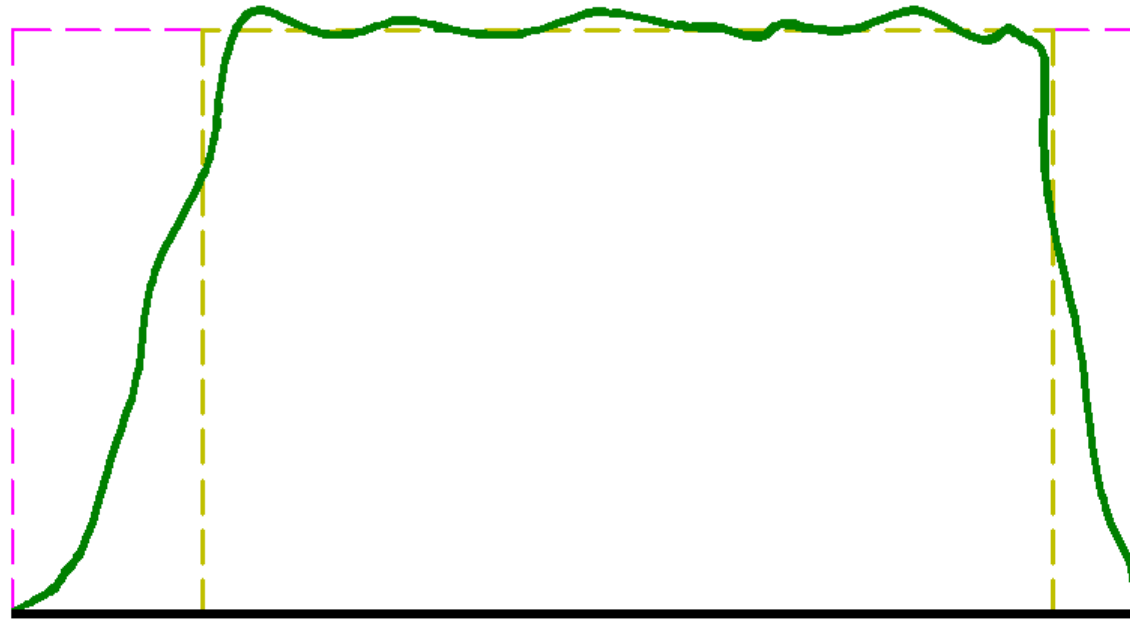
4. Zalecenia dla spoin

Napężenia resztkowe w przekrojach gorącowalcowanych i zimnogiętych koncentrują się w „zagiętych” fragmentach przekrojów. W tych obszarach należy unikać spawania.



Rys: Autor

Jakość spoin



Część początkowa –
rozruch spawarki

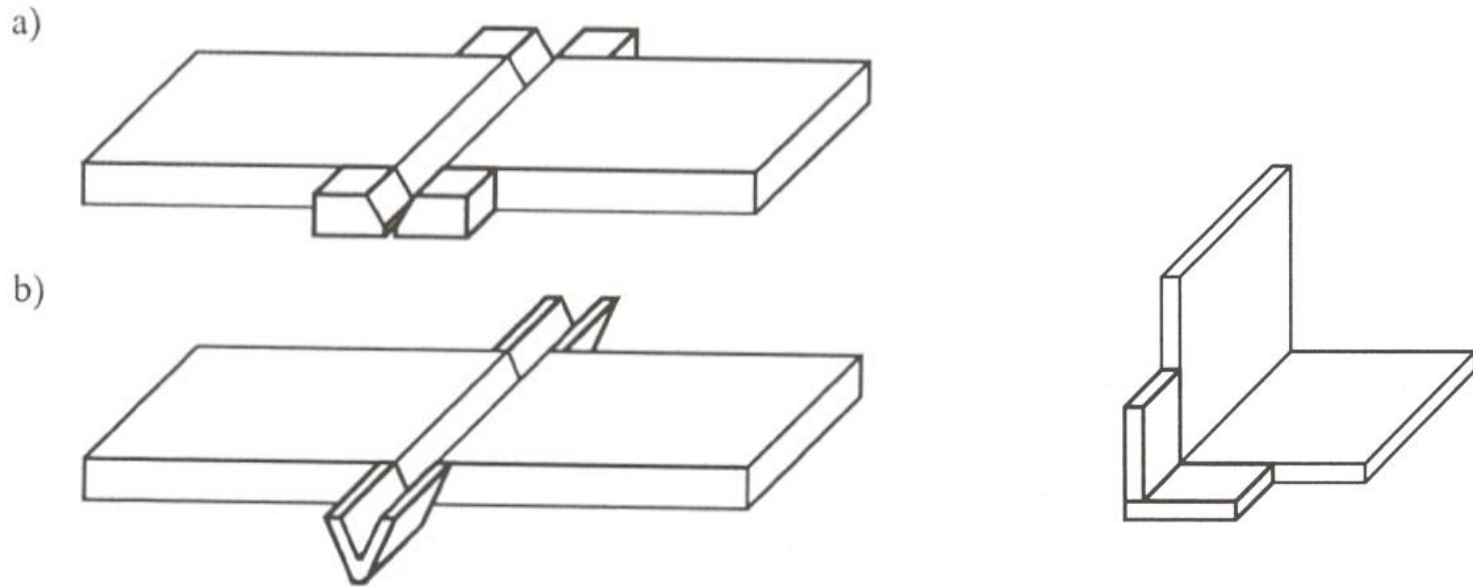
Rys: Autor

Cześć końcowa –
ryzyko przedwczesnego
wyłączenia spawarki

Jakość teoretyczna według modelu
matematycznego

Jakość rzeczywista

Jakość rzeczywista wedle modelu matematycznego – spoina zbyt krótka w porównaniu z obciążeniem

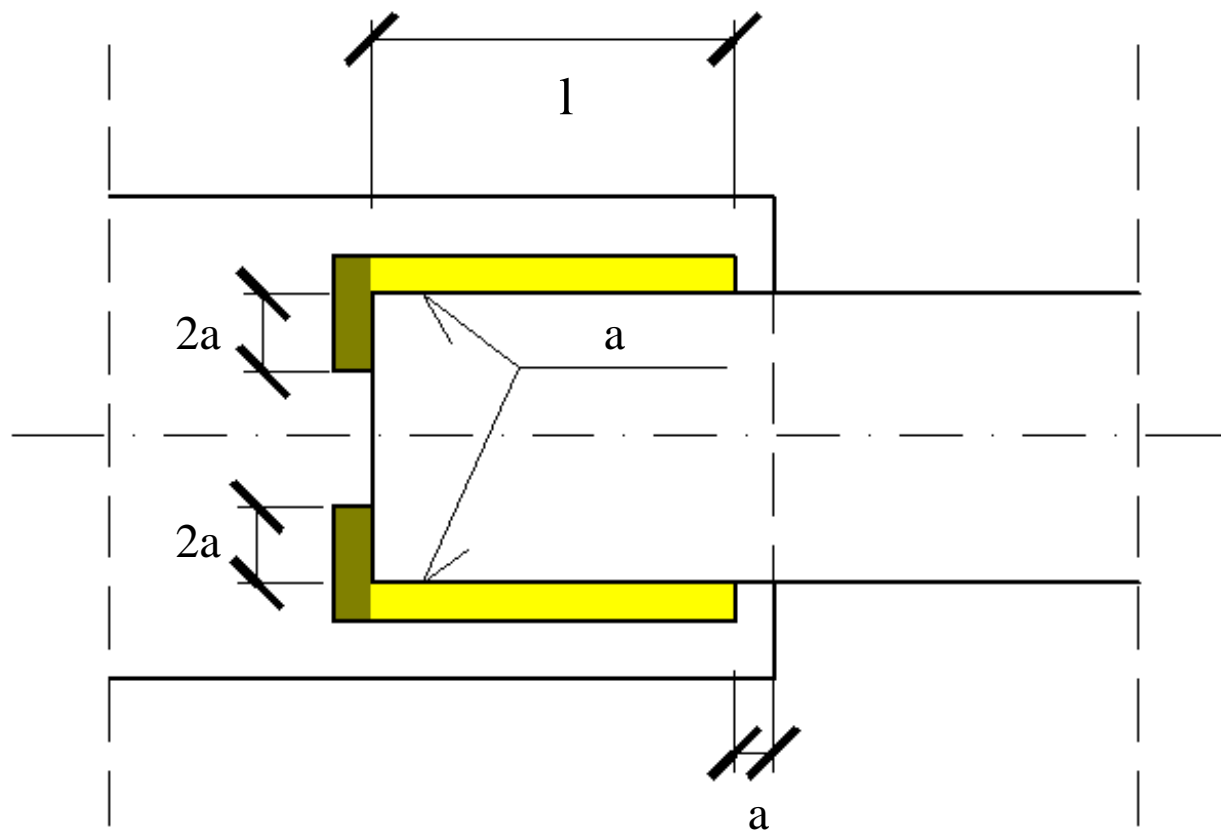


Rys: Konstrukcje stalowe, K. Rykaluk, Dolnośląskie
Wydawnictwo Edukacyjne Wrocław 2001

Płytki wybiegowe – spoina dłuższa niż w obliczeniach, przy czym część początkowa i końcowa jest następnie usuwana

Spoiny pachwinowe – długość obliczeniowa bez płytek wybiegowych

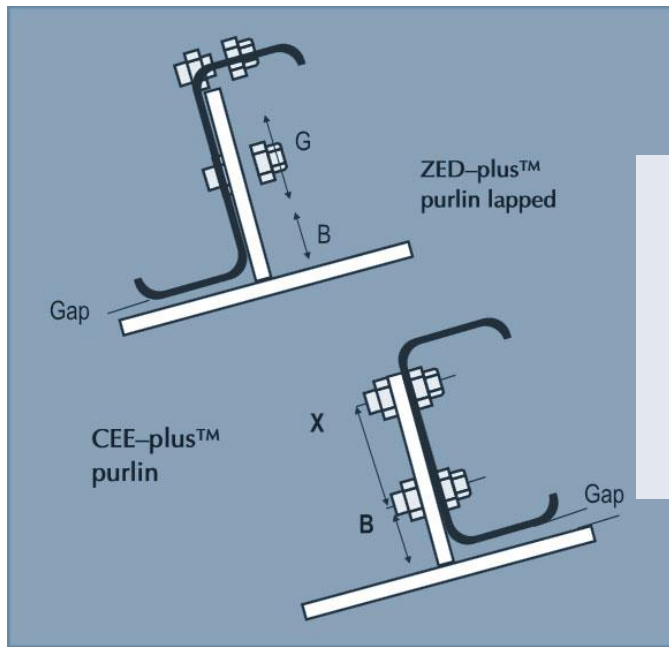
Rys: Autor



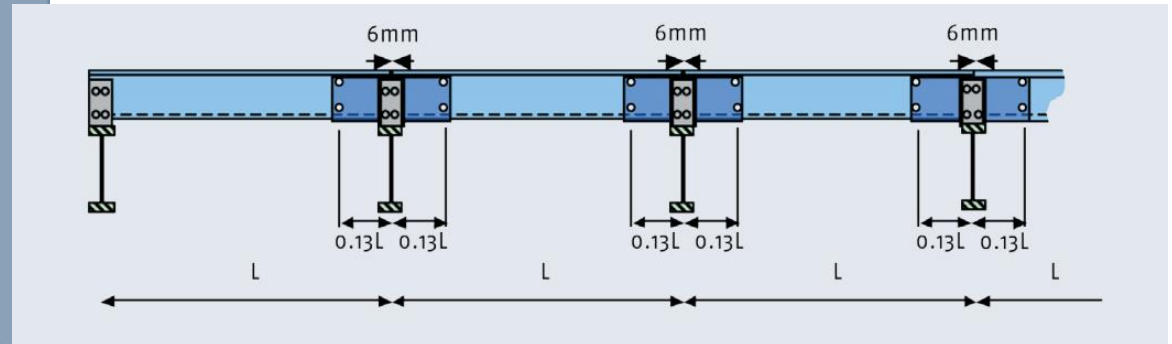
$$l_{(\text{obliczenia})} = l \quad \text{or} \quad l - 2a \quad \text{or} \quad l + 2a - 2a$$

5. Zalecenia dla płatwii zimnogiętych

Płatwie zimnogięte są mocowane nad górną powierzchnią dźwigara z niewielką szczeliną. Pozwala to uniknąć kolizji dźwigar-płatew w wyniku imperfekcji zamocowania płatwii, oraz lokalnych deformacji płatwii przy jej dociskaniu do dźwigara. Płatew zimnogięta to przekrój cienkościenny. Nawet niewielkie odkształcenia mogą znacząco zmienić jego przekrój i zmniejszyć nośność na zginanie.



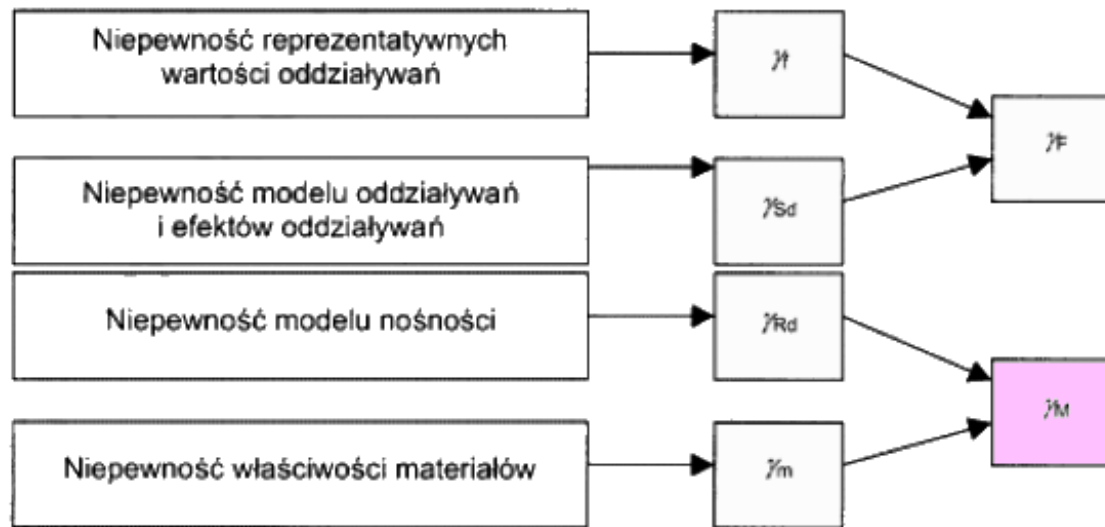
Rys: gsepl.net



Rys: ruuki.com

Dodatkowe współczynniki

Współczynniki bezpieczeństwa

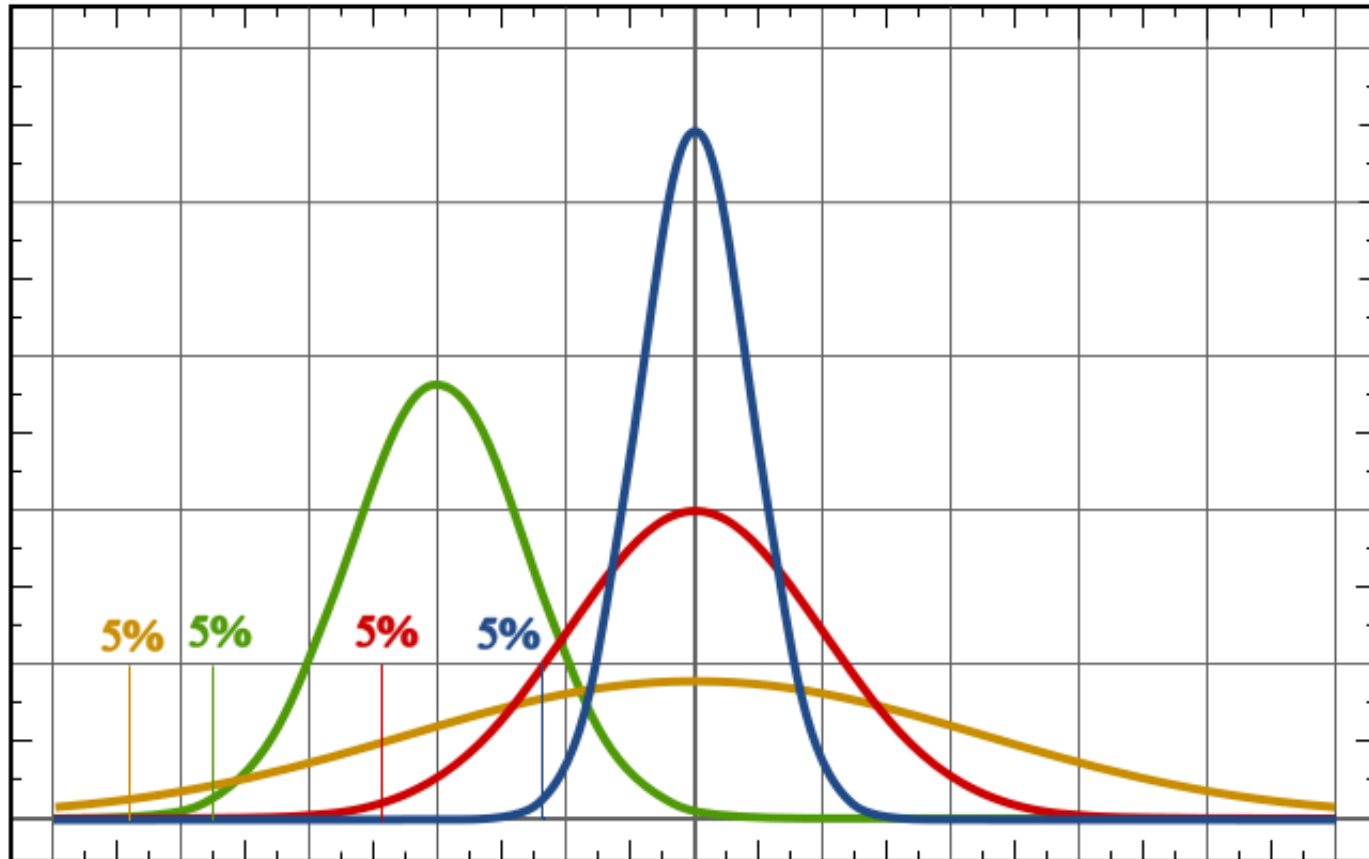


Rys: EN 1990 fig. C3

Niepewność w zakresie własności materiałowych oznacza m.in. nieznaną wpływ imperfekcji materiałowych

2. Przeliczenie wytrzymałości z wartości średniej do wartości charakterystycznej (wpływ imperfekcji materiałowych):

μ_{Re} (średnia), σ_{Re} (odchylenie standardowe), f_k (kwantyl dolny)



Rys: wikipedia

Tablica 6.2: Przyporządkowanie krzywych wyboczenia

Rodzaj elementu i typ przekroju		Ograniczenia	Wyboczenie względem osi	Krzywa wyboczenia	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Dwuteowniki walcowane		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a	a ₀
				b	a ₀
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b	a
				c	a
$h/b \leq 1,2$	y-y z-z	b	a		
		c	a		
$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d	c		
		d	c		
Dwuteowniki spawane		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b	b c
		$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c	c d
Kształtowniki rurowe		wykończone na gorąco	dowolna	a	a ₀
		wykończone na zimno	dowolna	c	c

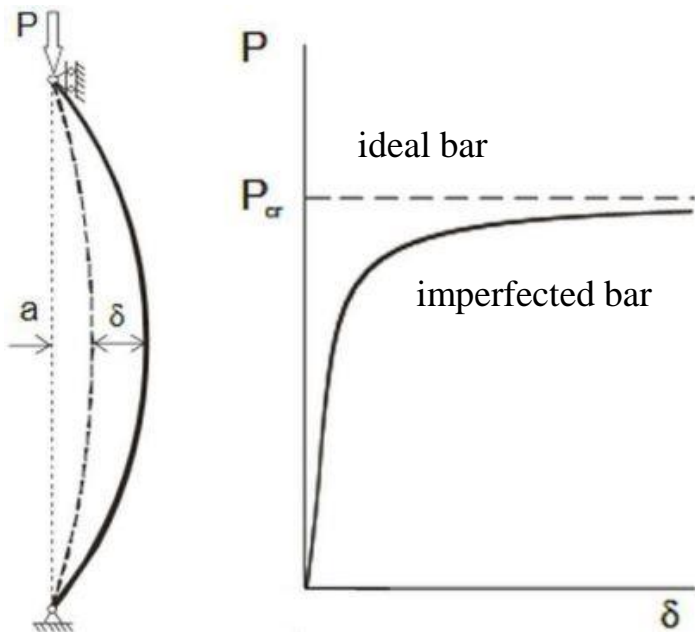
Krzywe wyboczeniowe

EN 1993-1-1,
tab. 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5

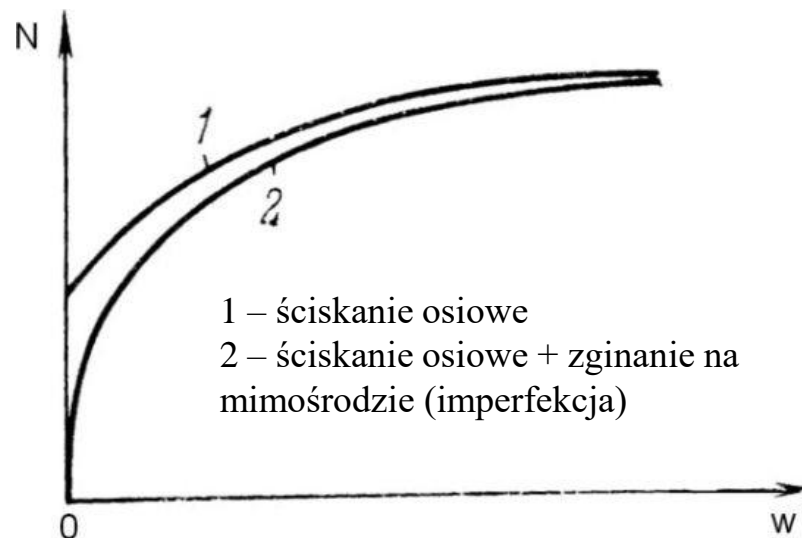
Różne krzywe dla różnych rodzajów przekrojów, w których istotne stają się odmienne rodzaje imperfekcji.

Tablica 6.1: Parametry imperfekcji krzywych wyboczenia

Krzywa wyboczenia	a ₀	a	b	c	d
Parametr imperfekcji α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

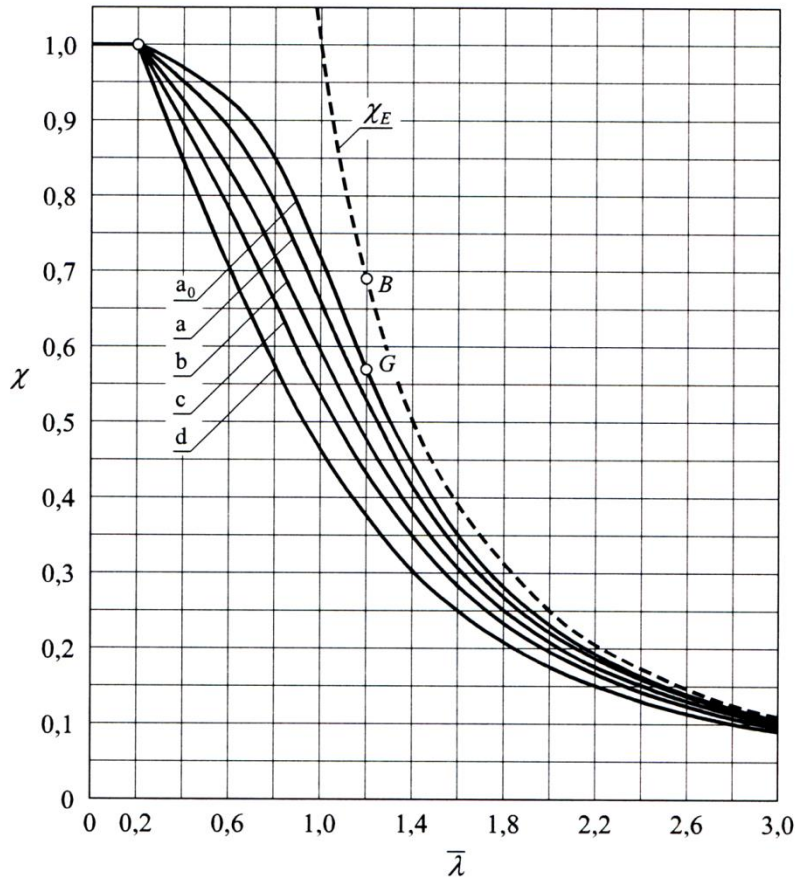


Rys: chodor-projekt.net



Rys: chodor-projekt.net

Imperfekcje wpływają na zachowanie prętów ściskanych. Ogólnie: zwiększenie imperfekcji powoduje zmniejszenie siły krytycznej i odporności na niestabilność.



Krzywe wyboczeniowe według Eurokodu i krzywa dla przypadku idealnego (bez imperfekcji materiałowych i geometrycznych) pręta ściskanego

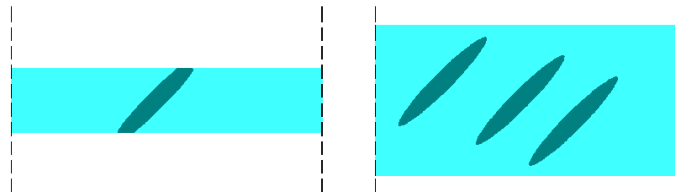
Rys: Zagadnienia stateczności konstrukcji metalowych, K. Rykaluk, DWE Wrocław 2012

Uwzględnienie pośrednie (wzięcie pod uwagę samego faktu istnienia imperfekcji bez ustalania ich wartości)

1. Zróżnicowanie wytrzymałości w zależności od grubości elementu (w grubszych większe prawdopodobieństwo ukrytych dużych rozmiarów imperfekcji materiałowych; EN 1993-1-1 tab 3.1)

Norma i gatunek stali	Nominalna grubość elementu t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NHL	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550

Rys: Autor



2. Zwichrzenie

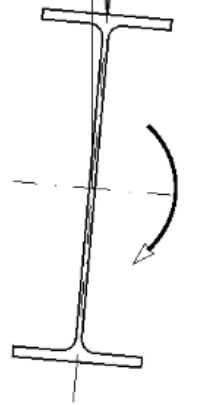
Zgodnie z wynikami z wykładu #5 moment krytyczny dla zwichrzenia zależy od punktu przyłożenia obciążenia. Przy obciążeniu przyłożonym do górnej półki belka traci stateczność łatwiej niż przy obciążeniu przyłożonym do dolnej półki.

Obciążenie przyłożone do	M_{cr} [kNm]	λ_{LT}	χ_{LT}	$\chi_{LT} W_{pl, y} f_y$ [kNm]	M_{Ed} / M_{Rd}
półki górnej	91,408	1,271	0,487	71,854	1,113
środek ścinania (= środek ciężkości)	118,515	1,116	0,585	86,323	0,927
półki dolnej	145,635	1,007	0,661	97,509	0,820

e
Obciążenie

Odształcenie od imperfekcji

Dodatkowe odkształcenie od momentu skręcającego



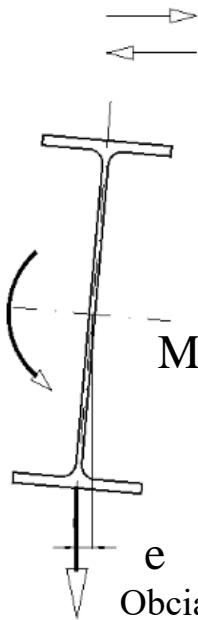
$$M_T = \text{obciążenie} \cdot e$$

Imperfekcja wstępna daje mimośród e i moment skręcający M_T jako wtórny efekt obciążenia.

→ #5 / 77

Odształcenie od imperfekcji

Dodatkowe odkształcenie od momentu skręcającego



$$M_T = \text{obciążenie} \cdot e$$

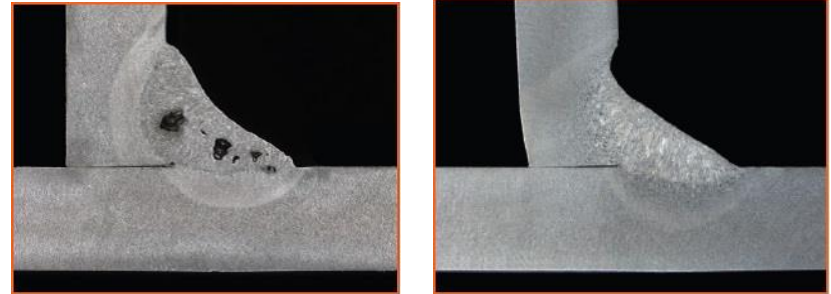
Rys: Autor

Różne punkty przyłożenia obciążenia dają różne deformacje. Deformacje pochodzące od momentu skręcającego mogą nasilać lub wygaszać efekty imperfekcji. W rezultacie, element może utracić stateczność łatwiej (mniejsze M_{cr}) lub trudniej (większe M_{cr})

3. Obliczenia zmęczeniowe






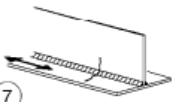
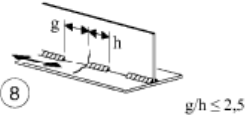
Rys: pmpaspeakingofprecision.com



Rys: figel.pl

Imperfekcje powstałe podczas obróbki (przycinanie, wiercenie otworów) oraz podczas spawania to mikrouszkodzenia zmniejszające odporność na zmęczenie. Należy je wziąć pod uwagę w przypadku obciążeń dynamicznych i cyklicznych. Początkowa nośność na zmęczenie, w zależności od rodzaju mikrouszkodzenia (tj. jego pochodzenia), jest opisana w EN 1993-1-11. Nośność zmęczeniowa maleje wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia

Różne wartości wytrzymałości zmęczeniowej dla różnego rodzaju karbów

Kategoria zmęczeniowa	Szczegół konstrukcyjny	Opis karbu	Wymagania
125		1) Spoiny czołowe wykonywane automatycznie obustronnie. 2) Spoiny pachwinowe wykonane automatycznie. Sprawdzenie nakładek – wg Tablicy 8.5, jak w przypadku elementu 6) lub 7).	Szczegóły 1) i 2); Nie dopuszcza się kraterów, chyba że naprawę powierza się specjalistom ¹⁰⁾ , a jej efekt podlega kontroli.
112		3) Spoiny czołowe lub pachwinowe wykonane automatycznie z obu stron, zawierające kraterki. 4) Spoiny czołowe wykonywane automatycznie jednostronnie na ciągłej podkładce bez kraterów.	4) Gdy w złączu występują kraterki, przyjmuje się kategorię 100.
100		5) Ręczne wykonywane spoiny pachwinowe lub czołowe. 6) Ręcznie lub automatycznie wykonane spoiny czołowe jednostronnie, w szczególności w dźwigarach skrzynkowych	5), 6) Bardzo dobre dopasowanie pasa i środka ma zasadnicze znaczenie. Brzeg środka powinien być tak przygotowany, aby próg spawania umożliwiał uzyskanie regularnego przetopu bez przerwań.
100		7) Naprawiane automatycznie lub ręcznie spoiny pachwinowe lub czołowe w elementach od 1) do 6).	7) Usunięcie widocznych niezgodności przez specjalistę drogą szlifowania i przeprowadzenie odpowiedniej kontroli może być podstawą do zachowania pierwotnej kategorii.
80		8) Przerzywane podłużne spoiny pachwinowe.	8) Zakres $\Delta\sigma$ oblicza się na podstawie naprężeń normalnych w pasie.
		9) Podłużne spoiny czołowe, pachwinowe lub przerzywane przy	9) Zakres $\Delta\sigma$ oblicza się na podstawie naprężeń normalnych

→ #2 / 82

EN 1993-1-9 tab. 8.1 - 8.10

EN 1993-3-2 tab. C-1

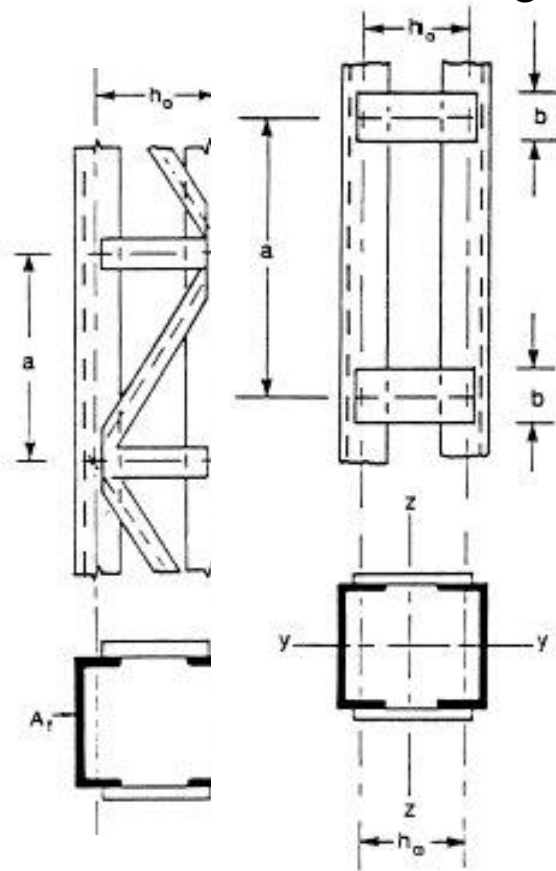
złącza zakładkowe sprężone śrubami o wysokiej wytrzymałości.	naprężeń w przekroju brutto	śrubowe (Szczegóły od 8) do 13)) – wymagania ogólne:
8) Złącza jak wyżej na śruby z iniekcją, sprężane.	8) ... dla naprężeń w przekroju brutto	Odległość czółowa: $e_1 \geq 1,5 d$
9) Dwustronne złącza zakładkowe na śruby pasowane.	9) ... dla naprężeń w przekroju netto	Odległość boczna: $e_2 \geq 1,5 d$
9) Dwustronne złącza zakładkowe na śruby z iniekcją, niesprężane.	9) ... dla naprężeń w przekroju netto.	Rozstaw: $p_1 \geq 2,5 d$
10) Jednostronne złącza zakładkowe sprężone śrubami o wysokiej wytrzymałości.	10) ... dla naprężeń w przekroju brutto.	Rozstaw: $p_2 \geq 2,5 d$
10) Złącza jak wyżej na śruby z iniekcją, sprężane.	10) ... dla naprężeń w przekroju brutto.	Wymiarowanie wg EN 1993-1-8 /Rysunek 3.1
11) Elementy nośne z otworami, poddane zginaniu lub sile podłużnej	11) ... dla naprężeń w przekroju netto	

Uwzględnienie bezpośrednie (ustalenie konkretnej wartości imperfekcji)

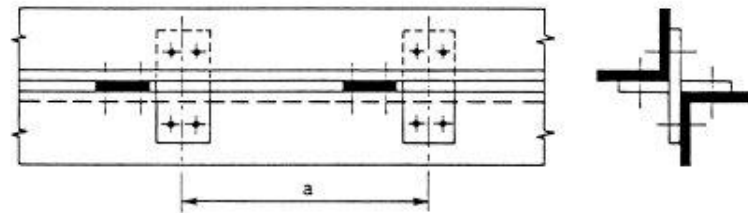
- 1 Imperfekcje w formie krzywizny wstępnej należy wprost wziąć pod uwagę w przypadku elementów wielogałęziowych. Elementy takie liczymy zawsze jako zginane, nawet jeśli obciążone są tylko siłą osiową.

$$M_{Ed}^{II} = e_{imperf} N_{Ed}$$

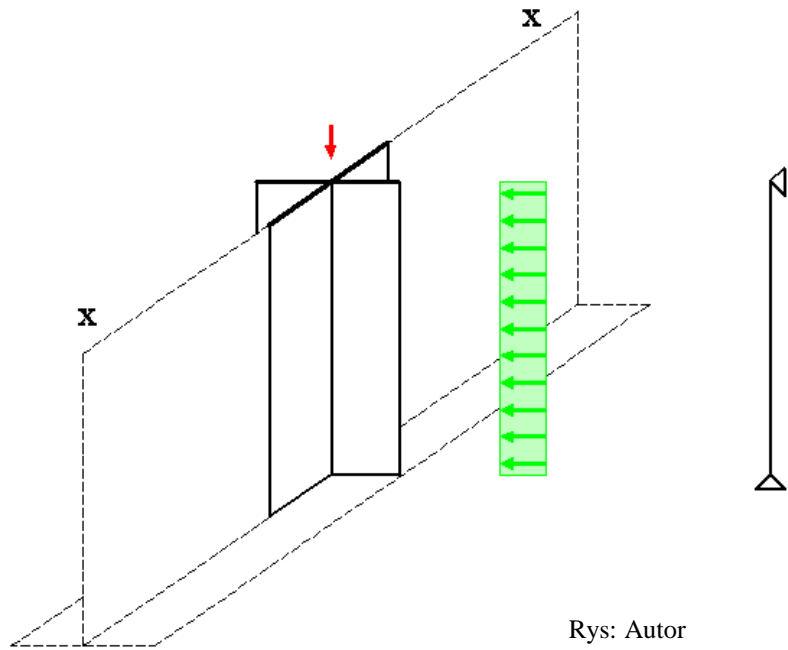
Rys: EN 1993-1-1 fig 6.7



Słupy skratowane,
Słupy z przewiązkami,
Pręty wielogałęziowe.



2 Żebra

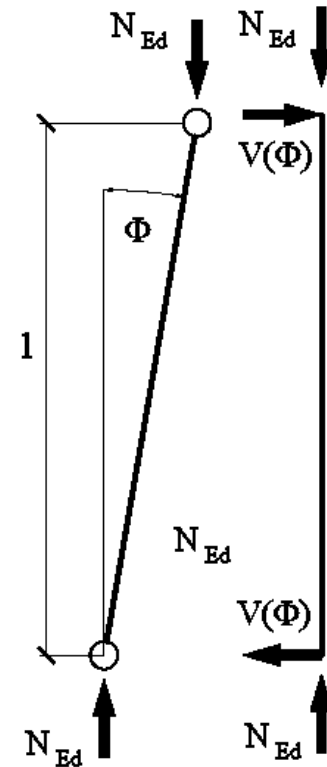
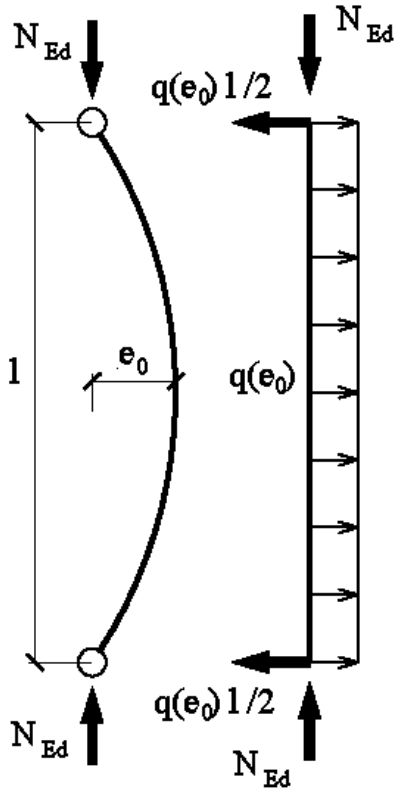


Rys: Autor

Z powodu imperfekcji łożyska i żebra, uwzględniamy dodatkowe obciążenia w formie **siły skupionej** i **poprzedniego obciążenia ciągłego**.

Więcej informacji przedstawione jest na wykładzie # 21

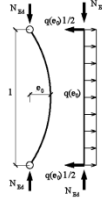
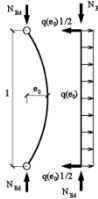
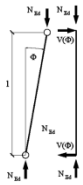
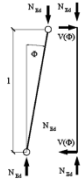
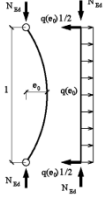
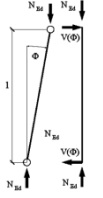
3. Wstępna imperfekcja wygięciowa i wstępna imperfekcja przechyłowa



Rys: Autor

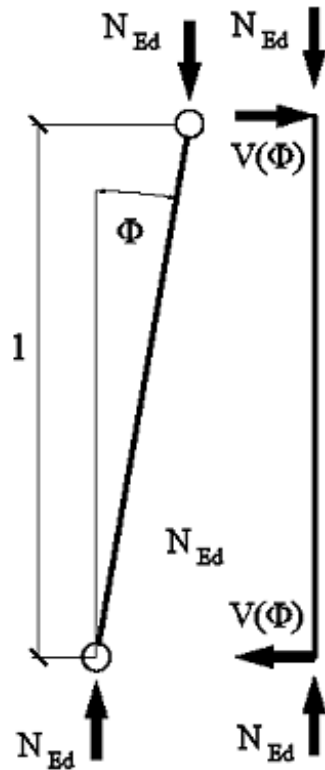
Przyjmujemy umowne imperfekcje i obciążamy konstrukcję zastępczym (równoważnym) układem obciążeń.

Dla różnych fragmentów konstrukcji używamy różnych modeli imperfekcji:

<p>stężenia poziome (dach)</p>	
<p>stężenia poziome (stropy)</p>	 <p style="text-align: center;">lub</p> 
<p>stężenia pionowe</p>	
<p>słupy</p>	 <p style="text-align: center;">i</p>  <p style="text-align: right;">(wzajemnie wykluczające się)</p>

Rys: Autor

Imperfekcja przechyłowa



Rys: Autor

$$\Phi = \Phi_0 \alpha_h \alpha_m$$

$$\Phi_0 = 1 / 200$$

$$\alpha_h = \max\{ 2 / 3 ; \min[(2 / \sqrt{h}) ; 1,0] \}$$

h – wysokość kondygnacji [m]

$$\alpha_m = \sqrt{[0,5 (1 + 1 / m)]}$$

m – ilość kolumn (elementów) biorąc pod uwagę tylko te z nich, które przenoszą siłę osiową N_{Ed} nie mniejszą niż 50% średniej z wszystkich rozpatrywanych.

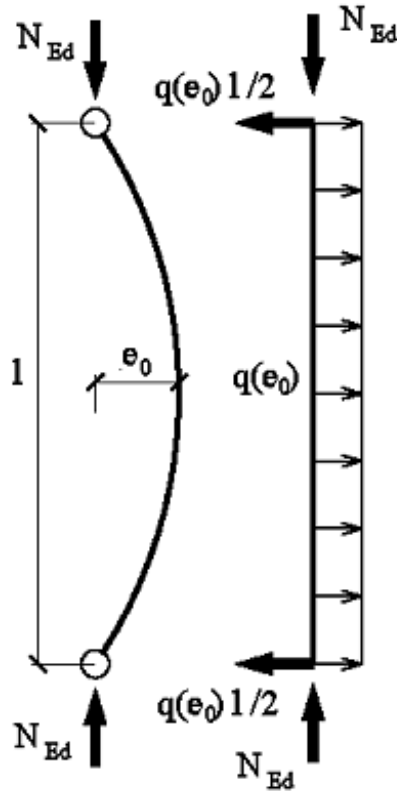
N_{Ed} – siła osiowa w słupie lub elemencie stężanym (pasie kratownicy itp).

$$V(\Phi) l = M = N_{Ed} l \Phi$$

$$V(\Phi) = N_{Ed} \Phi$$

Imperfekcja wygięciowa

e_0 zależy od krzywej wyboczeniowej (\rightarrow #5 / 25)



Rys: Autor

Krzywa wyboczeniowa	Analiza sprężysta	Analiza plastyczna
a_0	1 / 350	1 / 300
a	1 / 300	1 / 250
b	1 / 250	1 / 200
c	1 / 200	1 / 150
d	1 / 150	1 / 100

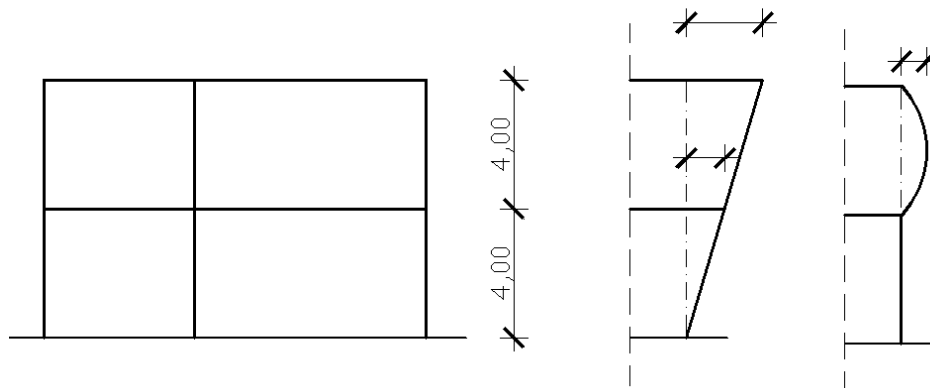
N_{Ed} – siła osiowa w słupie lub elemencie stężonym (pasie kratownicy itp).

$$N_{Ed} e_0 = M = q(e_0) l^2 / 8$$

$$q(e_0) = 8 N_{Ed} e_0 / l^2$$

Przykład

Porównanie wartości imperfekcji [m]

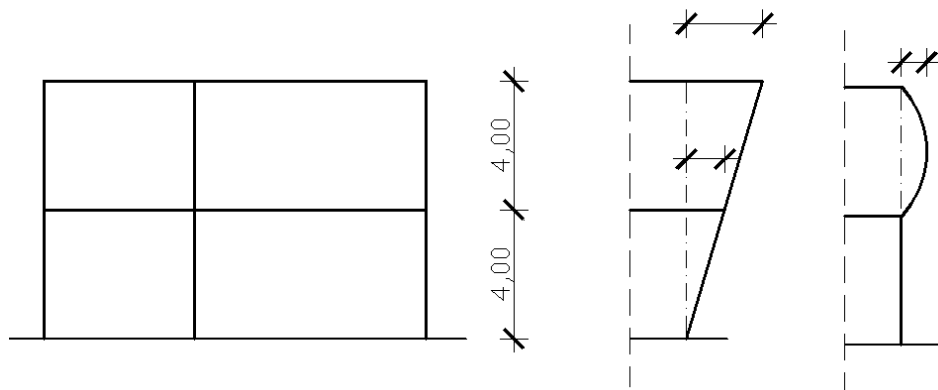


Rys: Autor

słup HEB 300, S235, wyboczenie względem osi y, analiza sprężysta

Imperfekcje podstawowe – imperfekcje funkcjonalne – imperfekcje obliczane

Imperfekcja przechyłowa dla całości – imperfekcja przechyłowa dla jednej kondygnacji –
imperfekcja wygięciowa

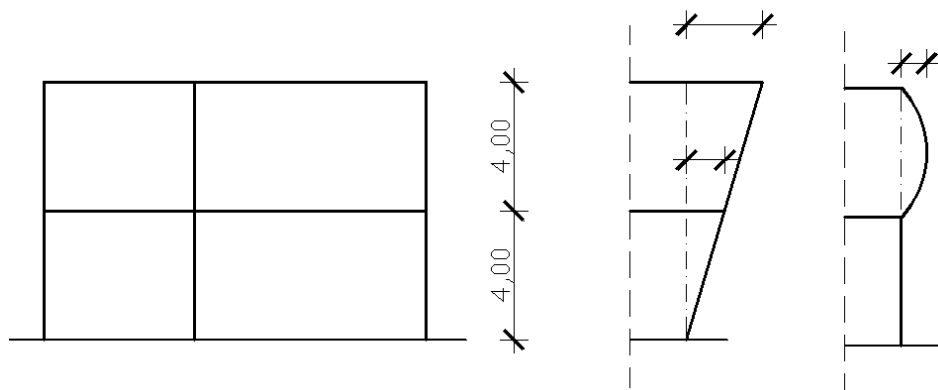


Imperfekcje podstawowe

Rys: Autor

Typ	Tablica	Wartość
imperfekcja przechyłowa dla całości	EN 1090-2, tab. D 1-12	$\pm \Sigma h / (300 \sqrt{n}) = \pm 8 / (300 \cdot 1,414) =$ $= \pm 0,019 \text{ m}$
imperfekcja przechyłowa dla jednej kondygnacji		$\pm h / 500 = \pm 4 / 500 =$ $= \pm 0,008 \text{ m}$
imperfekcja wygięciowa		$\pm h / 750 =$ $= \pm 0,007 \text{ m}$

n – ilość kondygnacji

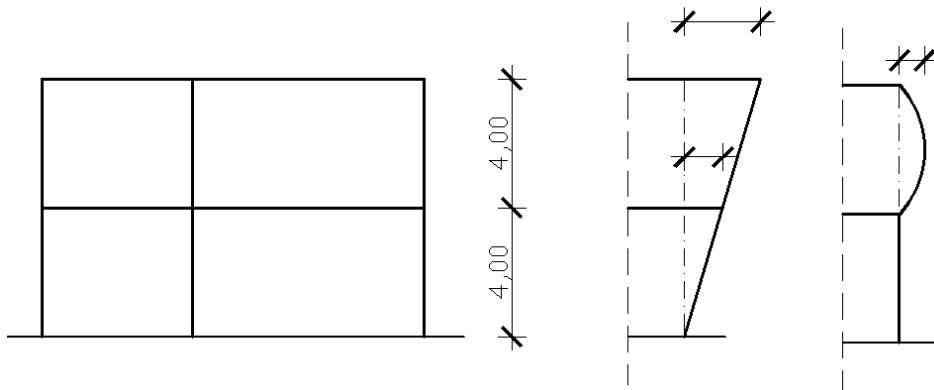


Imperfekcje funkcjonalne, Klasa 1

Rys: Autor

Typ	Tablica	Wartość
imperfekcja przechyłowa dla całości	EN 1090-2, tab. D 2-24	$\pm \Sigma h / (300 \sqrt{n}) = \pm 8 / (300 \cdot 1,414) =$ $= \pm 0,019 \text{ m}$
imperfekcja przechyłowa dla jednej kondygnacji		$\pm h / 500 = \pm 4 / 500 =$ $= \pm 0,008 \text{ m}$
imperfekcja wygięciowa		$\pm h / 750 =$ $= \pm 0,007 \text{ m}$

n – ilość kondygnacji



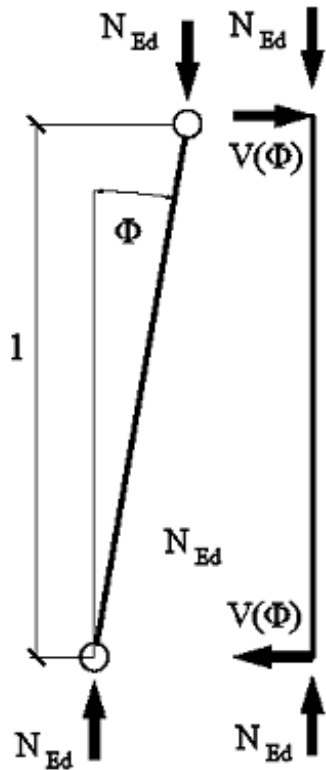
Imperfekcje funkcjonalne, Klasa 2

Rys: Autor

Typ	Tablica	Wartość
imperfekcja przechyłowa dla całości	EN 1090-2, tab. D 2-24	$\pm \Sigma h / (500 \sqrt{n}) = \pm 8 / (500 \cdot 1,414) =$ $= \pm 0,011 \text{ m}$
imperfekcja przechyłowa dla jednej kondygnacji		$\pm h / 1000 = \pm 4 / 1000 =$ $= \pm 0,004 \text{ m}$
imperfekcja wygięciowa		$\pm h / 1000 =$ $= \pm 0,004 \text{ m}$

n – number of storey

Imperfekcja przechyłowa - obliczenia



$$\Phi = \Phi_0 \alpha_h \alpha_m$$

$$\Phi_0 = 1 / 200$$

$$\alpha_h = \max\{ 2 / 3 ; \min[(2 / \sqrt{h}) ; 1,0] \}$$

h – wysokość kondygnacji [m]

Największa możliwa wartość $\alpha_h = 1,0$

$$\alpha_m = \sqrt{[0,5 (1 + 1 / m)]}$$

m – ilość słupów

Największa możliwa wartość $\alpha_m \rightarrow 1,0$

Największa możliwa wartość $\Phi_{\max} = 1 / 200$

Rys: Autor

Imperfekcja przechyłowa – obliczenia

Dla całości; $h = 8,0$ m, $m = 3$ słupy

Dla piętra; $h = 4,0$ m, $m = 3$ słupy

α	Całość	Piętro
α_h	$\begin{aligned} & \max\{2/3 ; \min[(2/\sqrt{h}) ; 1,0]\} = \\ & = \max\{2/3 ; \min[(2/\sqrt{8}) ; 1,0]\} = \\ & = \max\{0,667 ; \min[0,707 ; 1,0]\} = \\ & = \max\{0,667 ; 0,707\} = \\ & = 0,707 \end{aligned}$	$\begin{aligned} & \max\{2/3 ; \min[(2/\sqrt{h}) ; 1,0]\} = \\ & = \max\{2/3 ; \min[(2/\sqrt{4}) ; 1,0]\} = \\ & = \max\{0,667 ; \min[1,0 ; 1,0]\} = \\ & = \max\{0,667 ; 1,000\} = \\ & = 1,000 \end{aligned}$
α_m	$\begin{aligned} & \sqrt{[0,5(1 + 1/m)]} = \sqrt{[0,5(1 + 1/3)]} = \\ & = \sqrt{0,667} = \\ & = 0,816 \end{aligned}$	$\begin{aligned} & \sqrt{[0,5(1 + 1/m)]} = \sqrt{[0,5(1 + 1/3)]} = \\ & = \sqrt{0,667} = \\ & = 0,816 \end{aligned}$

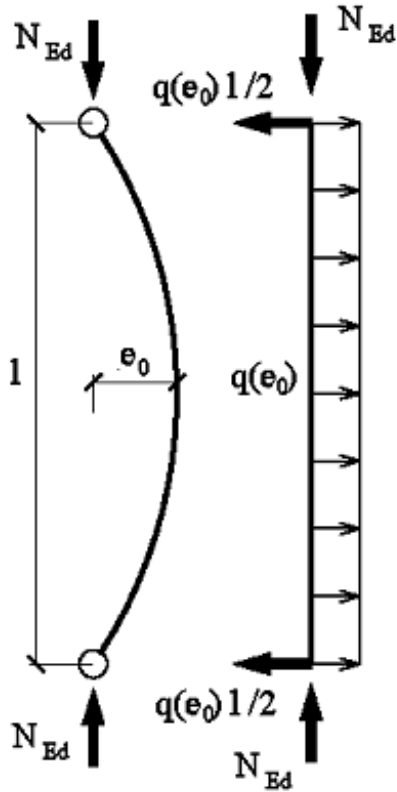
Imperfekcja przechyłowa – obliczenia

Dla całości; $h = 8,0 \text{ m}$, $m = 3 \text{ słupy}$

Dla piętra; $h = 4,0 \text{ m}$, $m = 3 \text{ słupy}$

Ilość kondygnacji	Wartość	
	Dla analizowanej konstrukcji	Maksymalna teoretycznie możliwa wartość
Cała konstrukcja	$\begin{aligned} & +/- h \Phi_0 \alpha_h \alpha_m = \\ & = +/- 8 \cdot 0,707 \cdot 0,816 / 200 = \\ & +/- 0,023 \text{ m} \end{aligned}$	$\begin{aligned} & +/- h \Phi_{\max} = +/- 8 / 200 = \\ & = +/- 0,040 \text{ m} \end{aligned}$
Jedno piętro	$\begin{aligned} & +/- h \Phi_0 \alpha_h \alpha_m = \\ & = +/- 4 \cdot 1,000 \cdot 0,816 / 200 = \\ & +/- 0,016 \text{ m} \end{aligned}$	$\begin{aligned} & +/- h \Phi_{\max} = +/- 4 / 200 = \\ & = +/- 0,020 \text{ m} \end{aligned}$

Imperfekcja wygięciowa - obliczenia

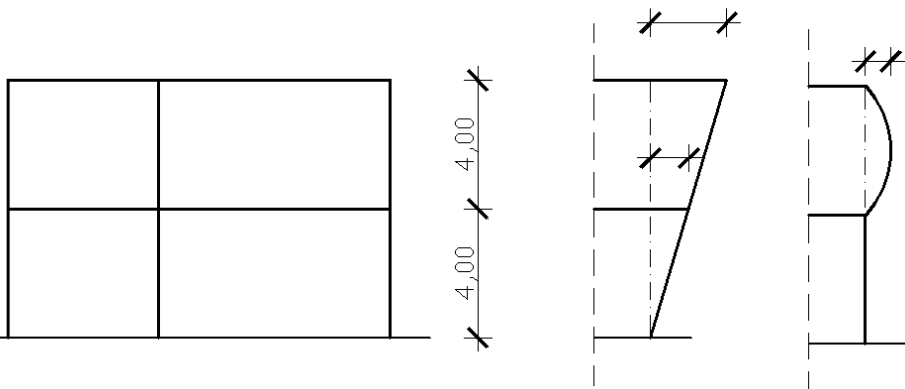


Rys: Autor

Krzywa wyboczeniowa	Analiza sprężysta	Analiza plastyczna
a_0	1 / 350	1 / 300
a	1 / 300	1 / 250
b	1 / 250	1 / 200
c	1 / 200	1 / 150
d	1 / 150	1 / 100

Słup HEB 300, S235, wyboczenie względem osi y, analiza sprężysta → EN 1993-1-1 tab 6.2 → krzywa b →
 → $\pm h / 250 = \pm 4 / 250 = \pm 0,016 \text{ m}$

Największa możliwa wartość $\pm h / 100 = \pm 0,040 \text{ m}$

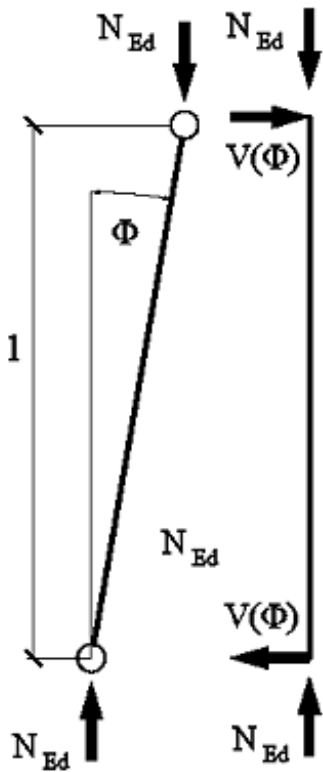


Porównanie wartości +/- [m]

Rys: Autor

Imperfekcje	Podstawowe	Funkcjonalne		Obliczenia	
		Klasa 1	Klasa 2	Analizowana konstrukcja	Max
Przechył - całość	0,019	0,019	0,011	0,023	0,040
Przechył - piętro	0,008	0,008	0,004	0,016	0,020
Wygięcie	0,007	0,007	0,004	0,016	0,040

Wymagania techniczne ograniczają wartość imperfekcji. Konstrukcja, która po wybudowaniu ich nie spełnia, wymaga naprawy lub rozebrania i wzniesienia ponownie. W **procesie obliczeniowym** dla bezpieczeństwa bierzemy pod uwagę imperfekcje większe niż dopuszczalne.



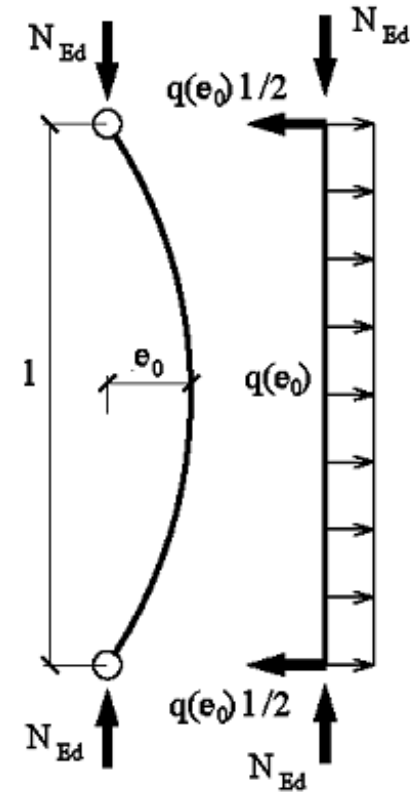
Zastępcze obciążenia związane z imperfekcją przechyłową i wygięciową dla jednej kondygnacji ($h = 4,0$ m):

$$h \Phi = 0,017 \text{ m} \rightarrow \Phi = 0,0043$$

$$h e_0 = 0,016 \text{ m} \rightarrow e_0 = 0,0040$$

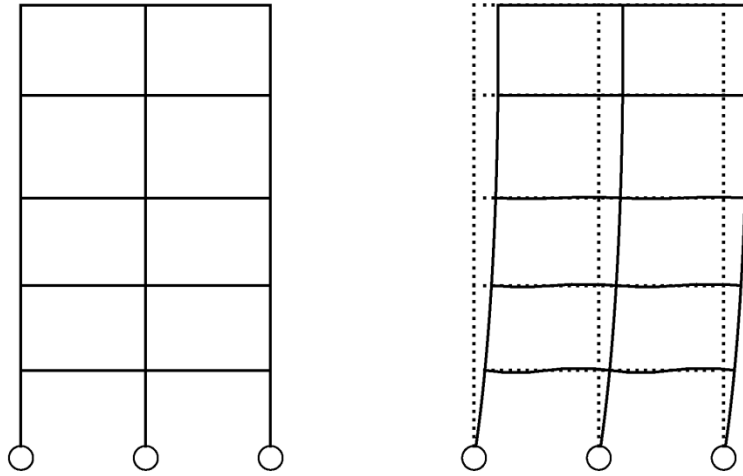
$$N_{Ed} = 150 \text{ kN}$$

Rys: Autor



$$V(\Phi) = N_{Ed} \Phi = 0,645 \text{ kN}$$

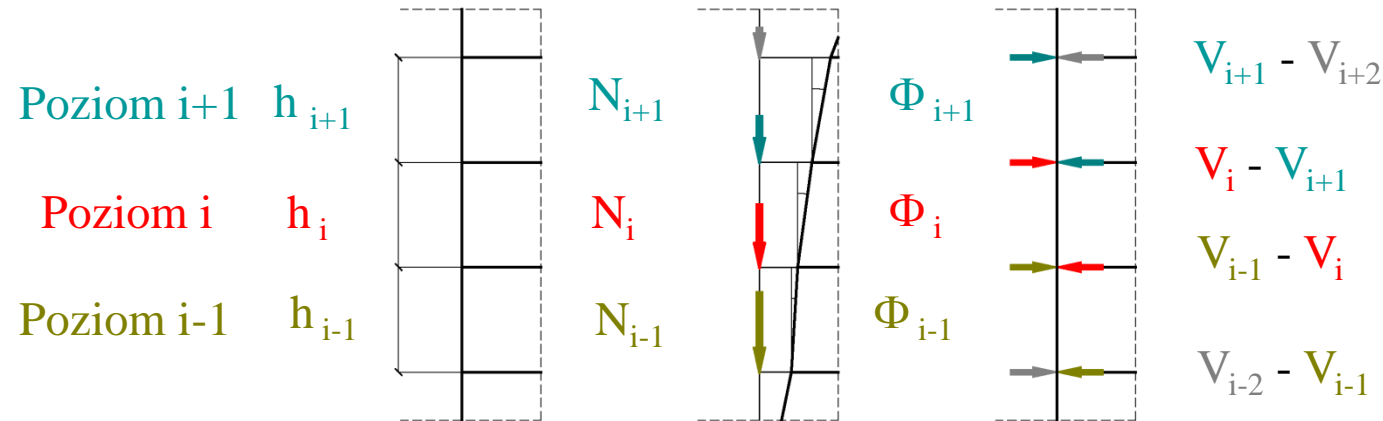
$$q(e_0) = 8 N_{Ed} e_0 / l^2 = 0,300 \text{ kN/m}$$



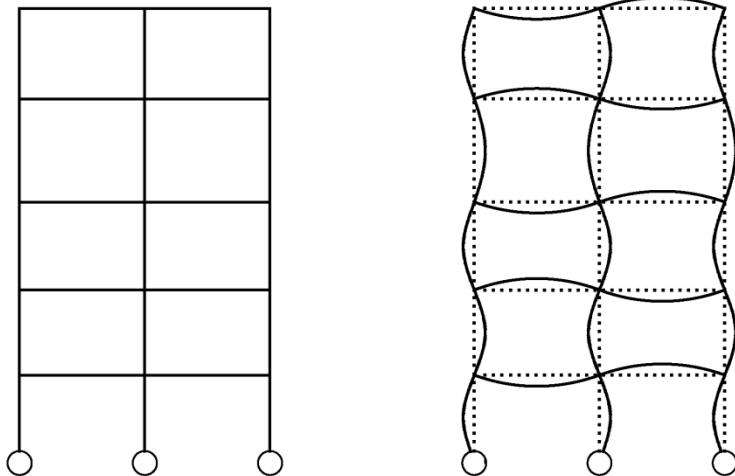
Rama wielokondygnacyjna,
imperfekcje przechyłowe
(globalne)

Kształt deformacji od
zastępczego obciążenia od
imperfekcji powinien być
zgodny z postacią utraty
stateczności

Global = sway



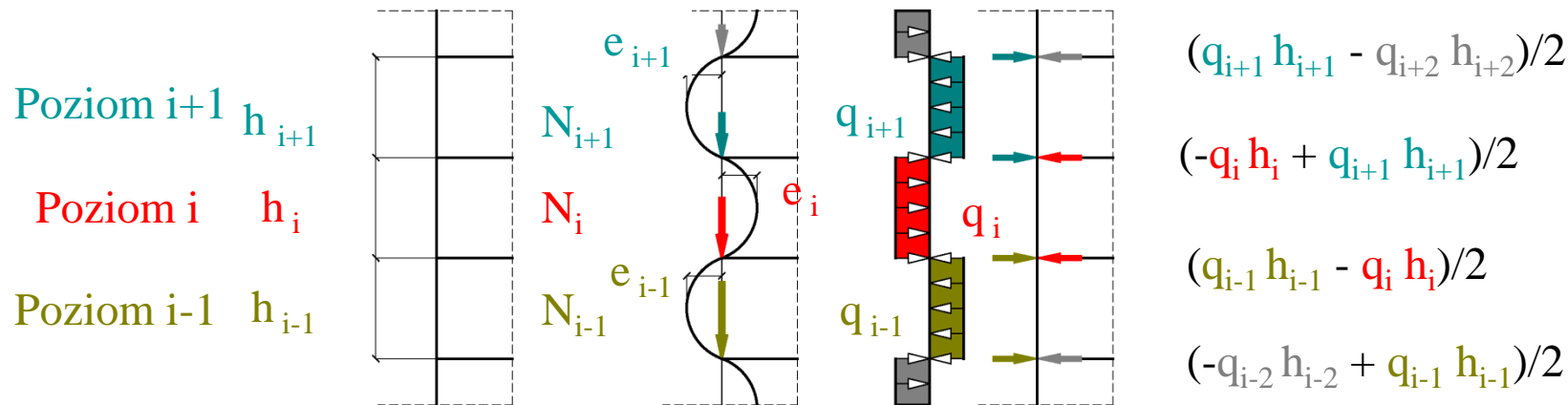
Rys: Autor



Rama wielokondygnacyjna,
imperfekcje wygięciowe (lokalne)

Kształt deformacji od
zastępczego obciążenia od
imperfekcji powinien być
zgodny z postacią utraty
stateczności

Wygięcie słupa rozpatrujemy w ramach poszczególnych kondygnacji, czyli lokalnie.



Rys: Autor

Zagadnienia egzaminacyjne

Rodzaje i przykłady imperfekcji

Znaczenie klas wykonania

Model obliczeniowy imperfekcji

Dziękuję za uwagę

© 2025 dr inż. Tomasz Michałowski

tmichal@pk.edu.pl