

# Konstrukcje metalowe

## Wykład XVI

### Technologia spawania

## Spis treści

Proces spawania → #t / 3

Normy → #t / 10

Rodzaje spoin → #t / 16

Pękanie stali → #t / 38

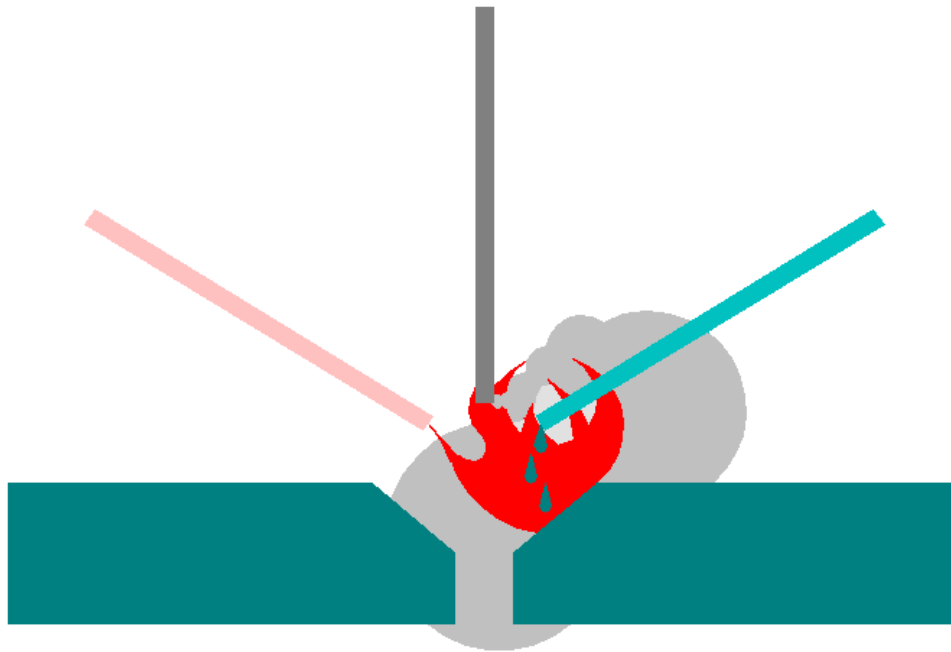
Imperfekcje → #t / 68

Naprężenia i odkształcenia resztkowe → #t / 79

Zagadnienia egzaminacyjne → #t / 91

## Proces spawania

Spawanie – dzięki wysokiej temperaturze łączone elementy są lokalnie stopione. Potrzebujemy **źródła ciepła**. Ciekła stal może reagować z tlenem atmosferycznym - potrzebujemy **źródła gazów osłonowych** by odciąć ją od tlenu. Spoina musi mieć odpowiednią jakość - potrzebujemy **źródła dodatków stopowych** dla zapewnienia odpowiedniego składu chemicznego spoiny (właściwy rodzaj elektrody). Po spawaniu spoina zastyga, dając jednolity materiał.

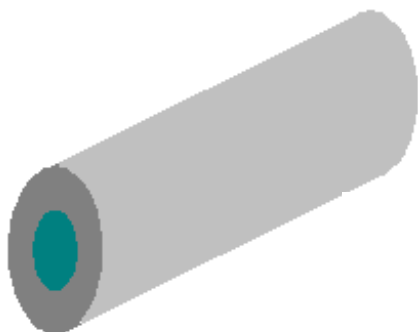


Rys: Autor

Elektrody otulone:

rdzeń jest źródłem domieszek stopowych;

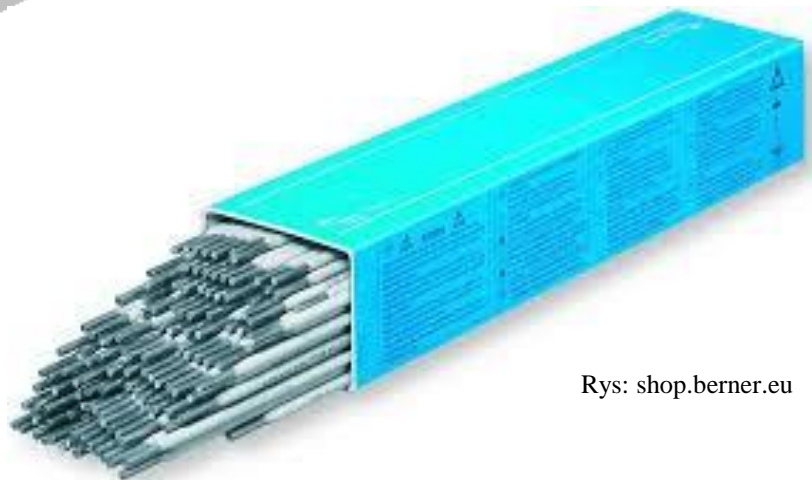
otulina produkuje gazy osłonowe i żużle, odcinające dostęp tlenu



Rys: Autor



Rys: ua.all.biz



Rys: shop.berner.eu

## Rodzaje spawań:

- gazowe;
- elektryczne (wiele rodzajów);
- termitowe;
- laserowe;

# Spawanie gazowe



Rys: plomien-zgorzelec.pl



Rys: elektroda.pl

- mieszanina tlenu i acetyleny
- temperatura  $\sim 3\ 000^{\circ}\text{C}$
- dwa osobne elementy: źródło ciepła (palnik) i elektroda (źródło domieszek i gazów osłonowych)
- metoda tania, najstarsza, mało precyzyjna, nie nadaje się do wszystkich gatunków stali; pękanie wodorowe ( $\rightarrow \#t / 60$ )

# Spawanie elektryczne



Rys: hak.com.pl

- wysoka temperatura łuku elektrycznego
- wiele różnych metod (MIG, MAG, TIG, plazmowe itp)
- najczęściej prąd płynie poprzez elektrodę, czyniąc ją równocześnie źródłem ciepła, domieszek i gazów
- metoda droga, dokładna, dla wszystkich rodzajów stali, najczęściej używana

## Spawanie termitowe



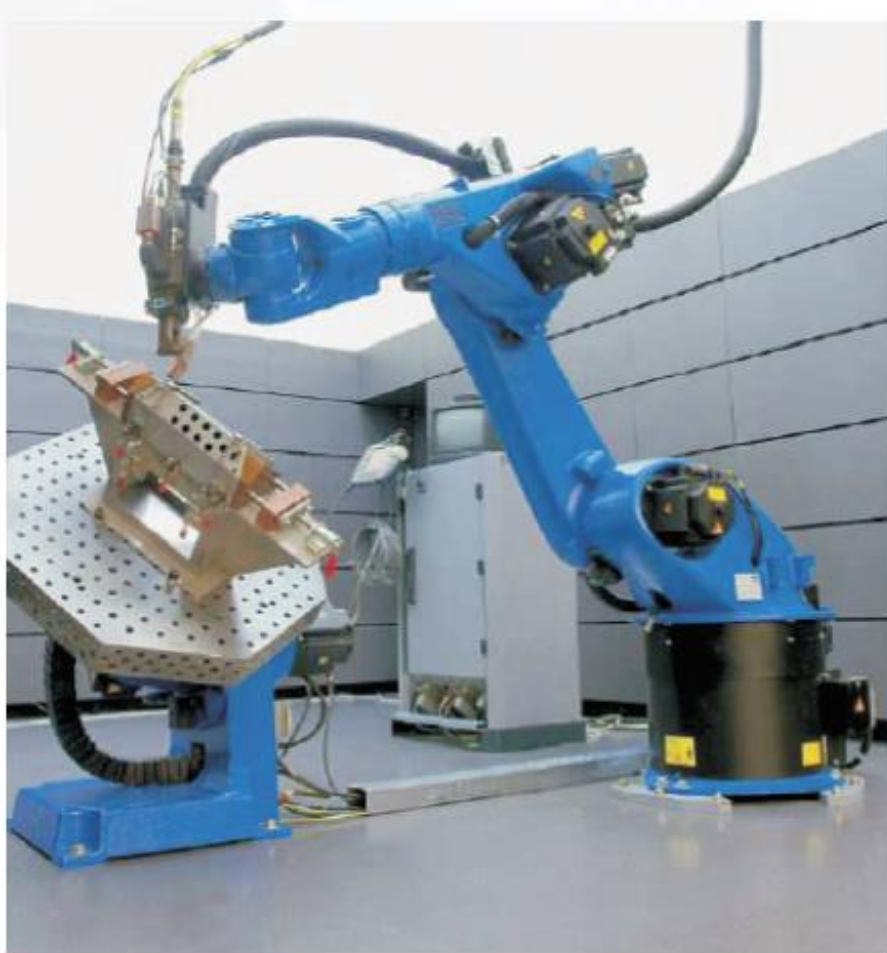
Rys: wikipedia

- termit: mieszanina  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$  (~75% + 25%)
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2 \text{Al} \rightarrow 2 \text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{energia}$
- temperatura do 4 000° C
- metoda mało precyzyjna, używana do spawania rur i szyn kolejowych



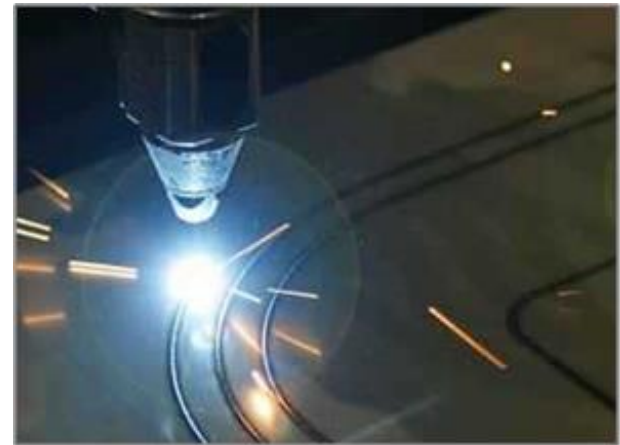
Rys: pl.all.biz

# Spawanie laserowe



Rys: spawanielaserowe.pl

- droga i bardzo precyzyjna
- raczej nie używana w budownictwie



Rys: ciecie-laserowe.co.pl

## Normy

EN 1090-2 Wymagania techniczne

EN 12345 Spawanie; terminologia dotycząca złączy spawanych wraz z ilustracjami.

EN ISO 6520-1 Spawanie i procesy pokrewne; klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach

EN 1991-1-8 Projektowanie węzłów  $t_{\min} \geq 4 \text{ mm}$

EN 1993-1-3 Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno  $t_{\min} \geq 2,5 \text{ mm}$

EN 1993-1-9 Zmęczenie

EN 1993-1-10 Dobór stali zewzględu na odporność na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową

Dodatkowo kilka norm ISO dla elektrod.

ISO 2560 Materiały dodatkowe do spawania - Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego elektrodą metalową stali niestopowych i drobnoziarnistych - Klasyfikacja

ISO 3580 Materiały dodatkowe do spawania - Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego elektrodą metalową stali odpornych na pełzanie - Klasyfikacja

ISO 3581 Materiały dodatkowe do spawania - Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego elektrodą metalową stali nierdzewnych i żaroodpornych - Klasyfikacja

ISO 18275 Materiały dodatkowe do spawania - Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego elektrodą metalową stali o wysokiej wytrzymałości - Klasyfikacja

# ISO 2560 tab. 8B

Klasyfikacja	Wytrzymałość na rozciąganie N/mm <sup>2</sup>	Granica plastyczności N/mm <sup>2</sup>	Wydłużenie A <sub>5</sub> %	Test Charpy'ego, karb V, temperatura
				°C
E4303	430	330	20	0
E4310	430	330	20	- 30
E4311	430	330	20	- 30
E4312	430	330	16	NS <sup>b</sup>
E4313	430	330	16	NS
E4316	430	330	20	- 30
E4318	430	330	20	- 30
E4319	430	330	20	- 20
E4320	430	330	20	NS
E4324	430	330	16	NS
E4327	430	330	20	- 30
E4340	430	330	20	0
E4903	490	400	20	0
E4910	480 to 650	400	20	- 30
E4911	480 to 650	400	20	- 30
E4912	490	400	16	NS
E4913	490	400	16	NS
E4914	490	400	16	NS
E4915	490	400	20	- 30

# EN 10025-2 tab. 7

**Tablica 7 – Własności mechaniczne w temperaturze otoczenia wyrobów płaskich i wyrobów długich dla gatunków stali grup jakościowych dla których określa się wartości pracy łamania**

Oznaczenie		Minimalna granica plastyczności $R_{eH}^a$ MPa <sup>b</sup>									Wytrzymałość na rozciąganie $R_m^a$ MPa <sup>b</sup>				
		Grubość nominalna mm									Grubość nominalna mm				
edług N 10027-1 CR 10260	według EN 10027-2	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	> 250 ≤ 400 <sup>c</sup>	< 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250	> 250 ≤ 400 <sup>c</sup>
235JR	1.0038	235	225	215	215	215	195	185	175	-	360 do 510	360 do 510	350 do 500	340 do 490	-
235J0	1.0114	235	225	215	215	215	195	185	175	-	360 do 510	360 do 510	350 do 500	340 do 490	-
235J2	1.0117	235	225	215	215	215	195	185	175	165	360 do 510	360 do 510	350 do 500	340 do 490	330 do 480
275JR	1.0044	275	265	255	245	235	225	215	205	-	430 do 580	410 do 560	400 do 540	380 do 540	-
275J0	1.0143	275	265	255	245	235	225	215	205	-	430 do 580	410 do 560	400 do 540	380 do 540	-
275J2	1.0145	275	265	255	245	235	225	215	205	195	430 do 580	410 do 560	400 do 540	380 do 540	380 do 540
355JR	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	-	510 do 680	470 do 630	450 do 600	450 do 600	-
355J0	1.0553	355	345	335	325	315	295	285	275	-	510 do 680	470 do 630	450 do 600	450 do 600	-
355J2	1.0577	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510 do 680	470 do 630	450 do 600	450 do 600	450 do 600
355K2	1.0596	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510 do 680	470 do 630	450 do 600	450 do 600	450 do 600
450J0 <sup>d</sup>	1.0590	450	430	410	390	380	380	-	-	-	-	550 do 720	530 do 700	-	-

**Tablica 7 – Własności mechaniczne w temperaturze otoczenia wyrobów płaskich i wyrobów długich dla gatunków stali grup jakościowych dla których określa się wartości pracy łamania (dokończenie)**

Oznaczenie		Polożenie próbek do badań <sup>a</sup>	Minimalne wydłużenie procentowe po rozerwaniu <sup>a</sup>										
			$L_0 = 80$ mm Grubość nominalna mm					$L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$ Grubość nominalna mm					
według EN 10027-1 i CR 10260	według EN 10027-2		≤ 1	> 1 ≤ 1,5	> 1,5 ≤ 2	> 2 ≤ 2,5	> 2,5 < 3	≥ 3 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250	> 250 <sup>c</sup> ≤ 400 tylko dla J2 i K2
S235JR	1.0038	l	17	18	19	20	21	26	25	24	22	21	-
S235J0	1.0114												-
S235J2	1.0117	t	15	16	17	18	19	24	23	22	22	21	21 (lit)
S275JR	1.0044	l	15	16	17	18	19	23	22	21	19	18	-
S275J0	1.0143												-
S275J2	1.0145	t	13	14	15	16	17	21	20	19	19	18	18 (lit)
S355JR	1.0045	l	14	15	16	17	18	22	21	20	18	17	-
S355J0	1.0553												-
S355J2	1.0577												17 (lit)
S355K2	1.0596	t	12	13	14	15	16	20	19	18	18	17	17 (lit)
S450J0 <sup>d</sup>	1.0590	l	-	-	-	-	-	17	17	17	17	-	-

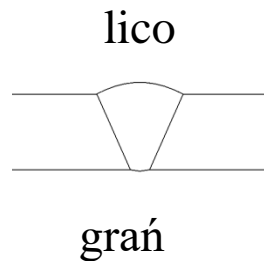
Elektroda: granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie, wynik testu Charpy'ego;

Stal: granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie, wynik testu Charpy'ego;

Te cztery parametry powinny być do siebie jak najbardziej zbliżone.

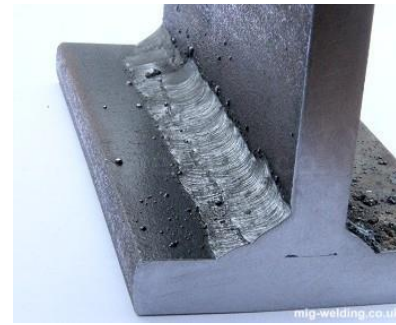
## Rodzaje spoin

Spoiny						
Pachwinowe			Czołowe		Otworowe	Szeroko- bruzdowe
„Zwykłe”	Przerywane	Obwodowe	Z pełnym przetopem	Z niepełnym przetopem		
#t / 17, 18, 23, 24, 28	#t / 17, 18, 19, 23, 24, 28	#t / 17, 18, 20, 23, 24, 27, 28	#t / 17, 18, 21, 25, 26, 28	#t / 17, 18, 21, 25, 26, 28	#t / 20, 27	#t / 22

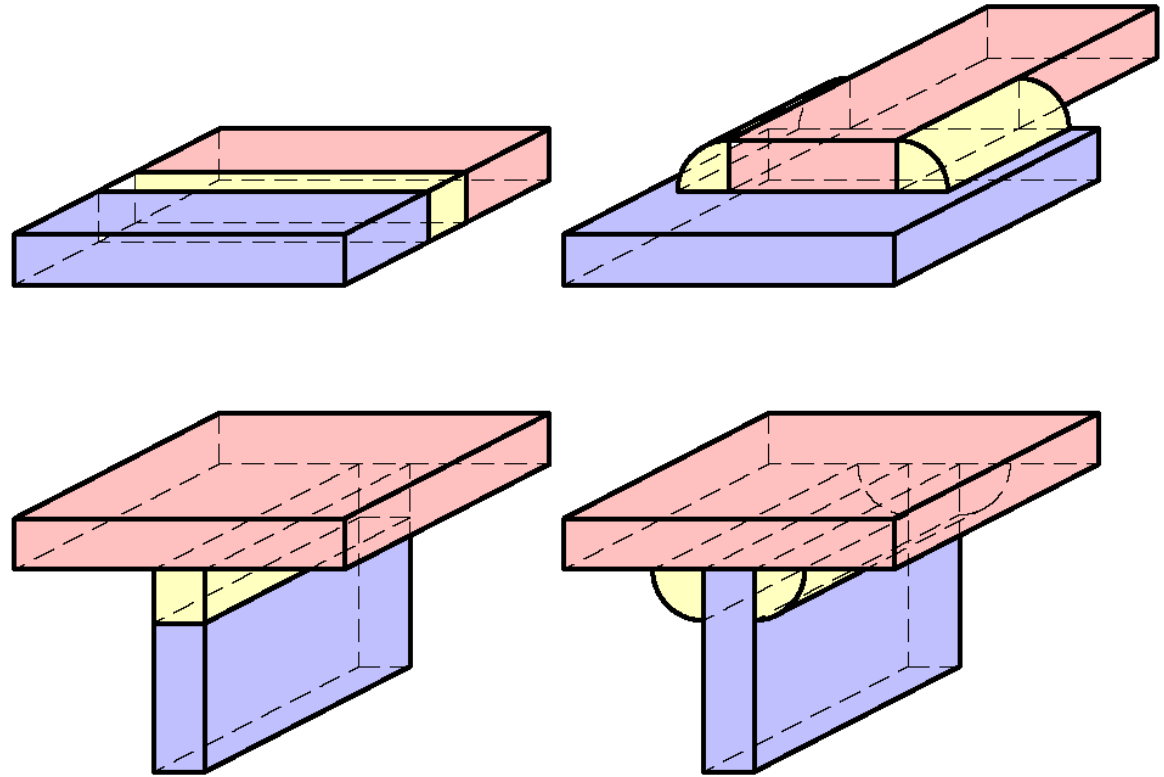


Rys: Autor

Rys: mig-welding.co.uk



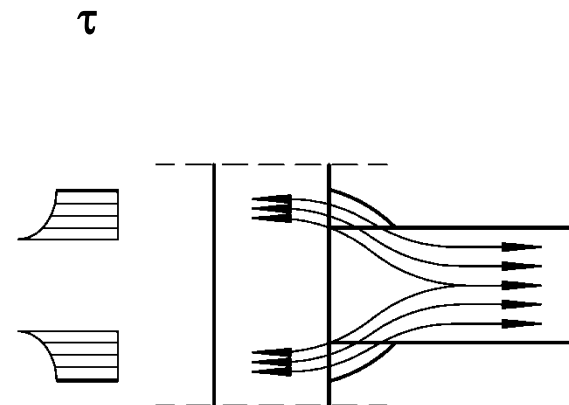
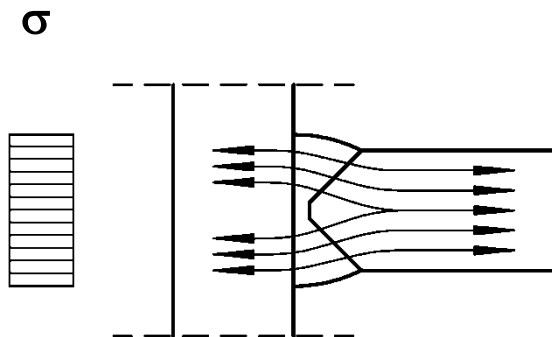
Rys: mig-welding.co.uk



Spoiny czołowe

Rys: Autor

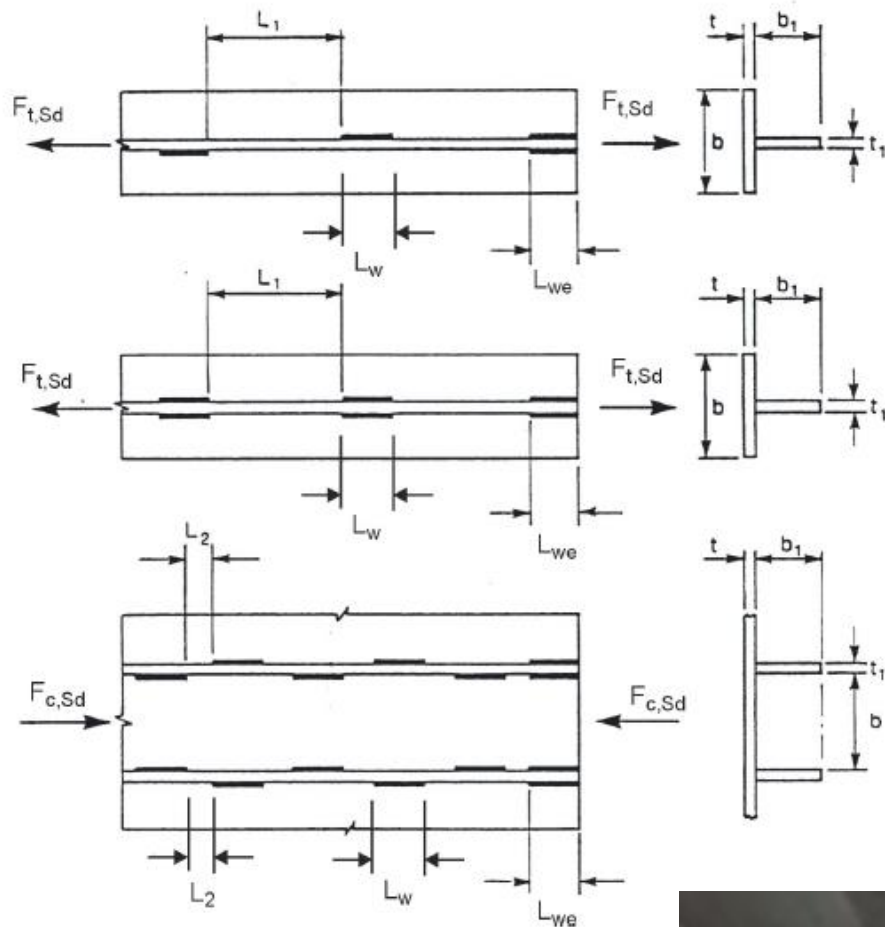
Spoiny pachwinowe



Rys: Autor

Naprężenia w spoinie  
czołowej

Naprężenia w spoinie  
pachwinowej



## Spoiny pachwinowe przerywane

$$L_{we} \geq \min(0,75 b ; 0,75 b_1)$$

rozciągane:

$$L_1 \leq \min(16 t ; 16 t_1 ; 200 \text{ mm})$$

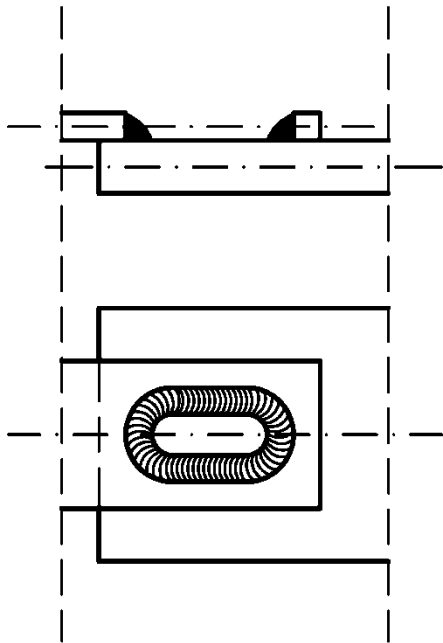
ściskane lub ścinane:

$$\leq \min(12 t ; 12 t_1 ; 0,25 b ; 200 \text{ mm})$$

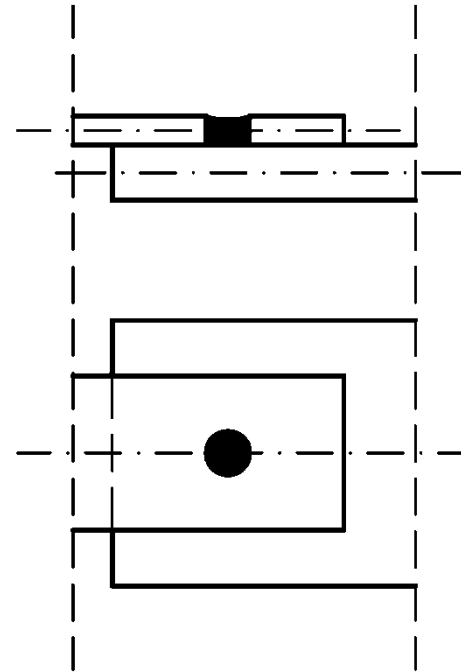
Rys: EN 1993-1-8 fig 4.1

Rys: resources.arcmachines.com





Rys: Autor



## Spoiny pachwinowe obwodowe

## Spoiny otworowe

Rys: dirtydragonfabrication.com



Plug Weld

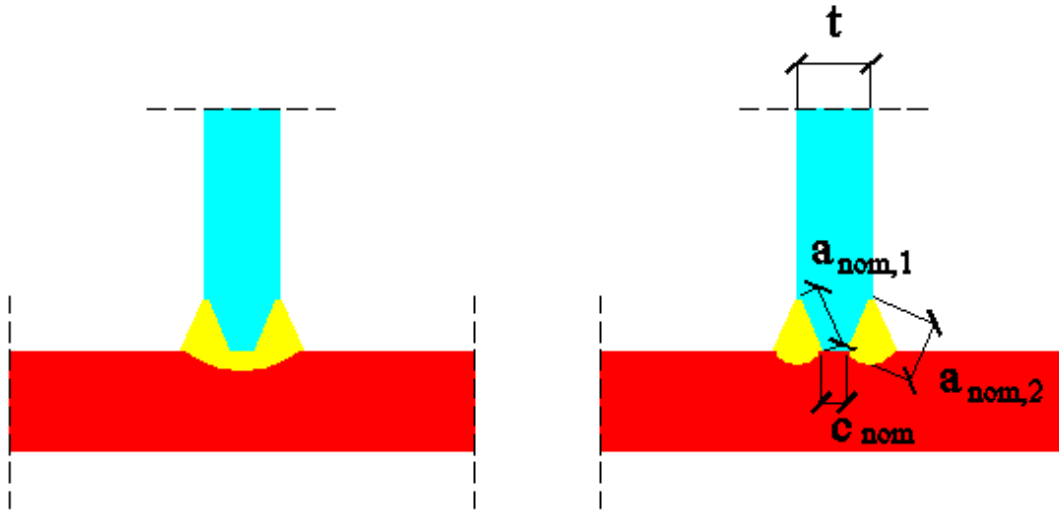


Slot Weld



Rys: Experimental Fatigue Evaluation of Welded Connections in Cantilevered Steel Sign Structures, Sim H-B, Uang C-M, Journal of Structural Engineering, 139 / 12

## Spoiny czołowe z pełnym przetopem



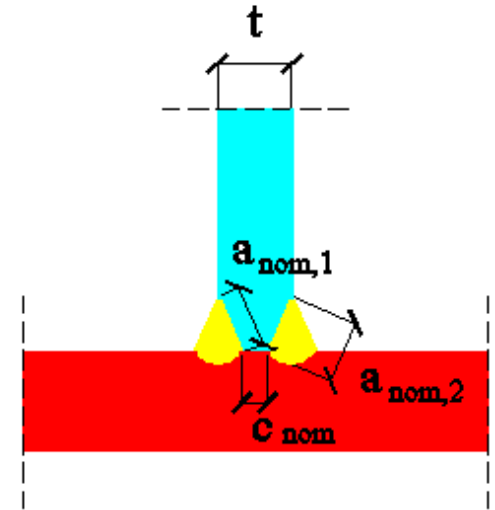
$$a_{\text{nom},1} + a_{\text{nom},1} \geq t$$

and

$$c_{\text{nom}} = \min(3 \text{ mm} ; t / 5)$$

Rys: Autor

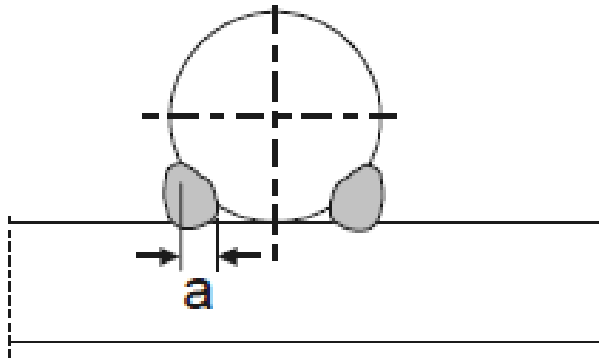
## Spoiny czołowe z niepełnym przetopem



$$a_{\text{nom},1} + a_{\text{nom},1} < t$$

or

$$c_{\text{nom}} > \min(3 \text{ mm} ; t / 5)$$



Rys: scottmetals.com.au

## Spoiny szerokobrzdowe

Rys: EN 1993-1-8 fig 4.2



Rys: steeltubeinstitute.org

## Geometria spoin pachwinowych

$$a \geq 3 \text{ mm} \quad l_{\min} = \max(6a; 30 \text{ mm})$$

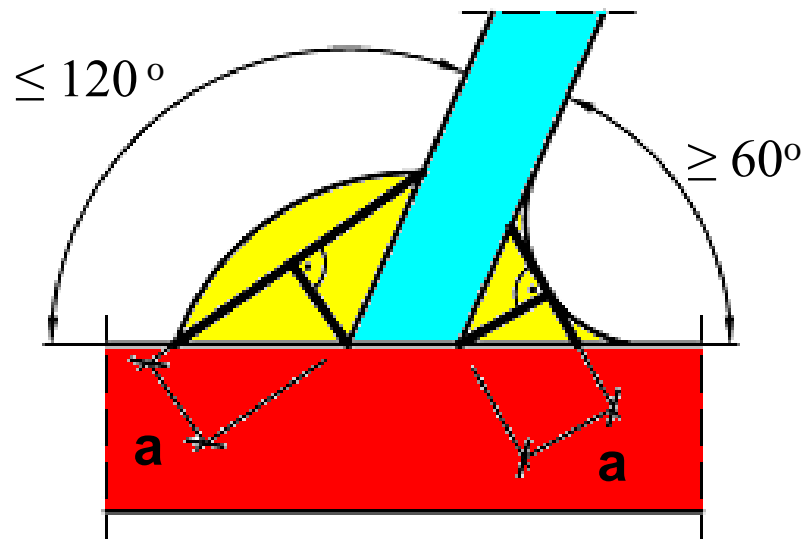
$$0,2 t_2 \leq a \leq 0,7 t_1$$
$$t_2 \geq t_1$$

(PN-B 3200)

$$150 a \geq 1$$

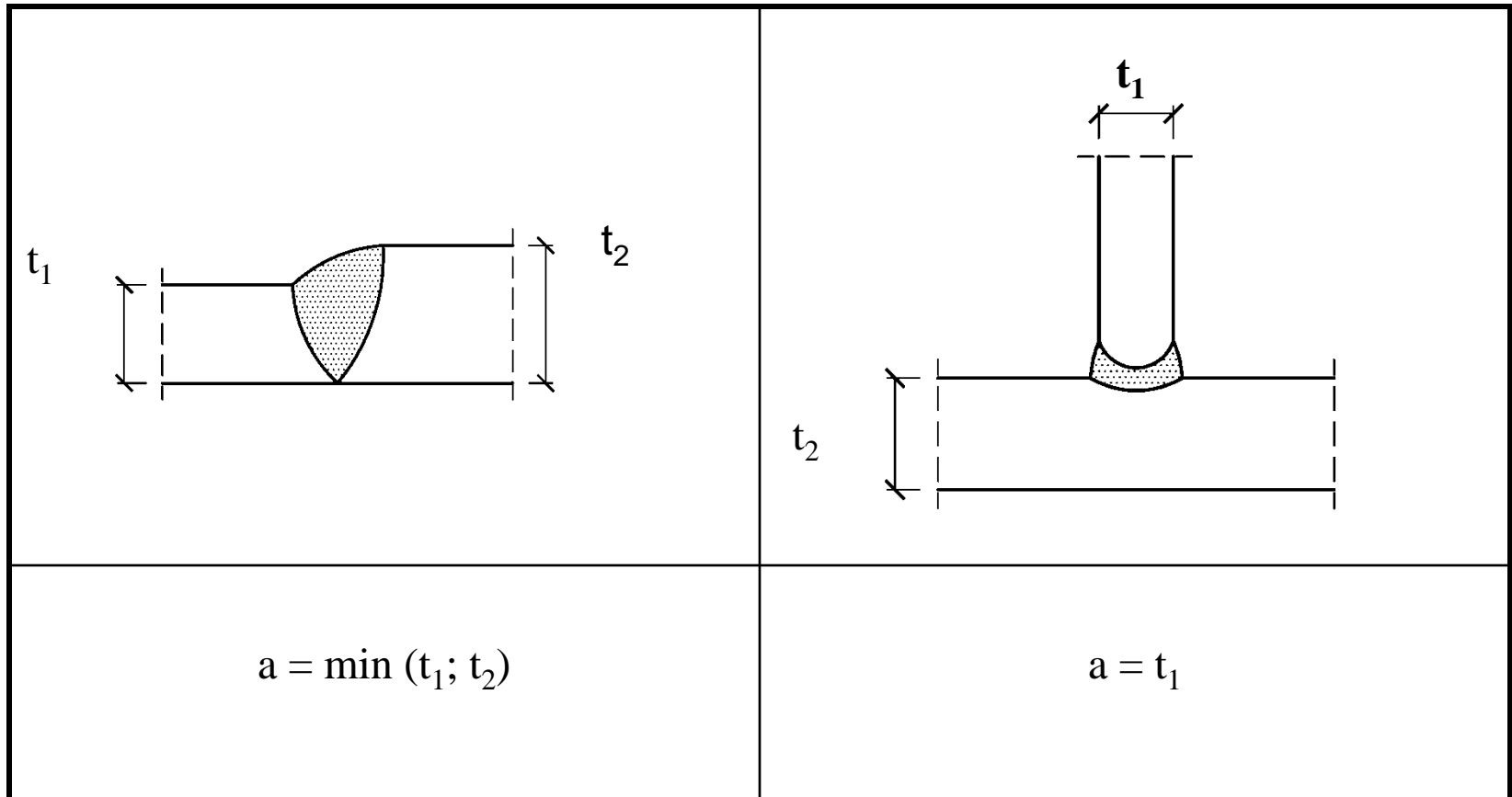
(EN 1993-1-8)

Spoiny pachwinowe – dopuszczalne kąty między elementami (EN 1993-1-5 p.4.3.2.1)



Rys: Autor

## Spoiny czołowe - geometria

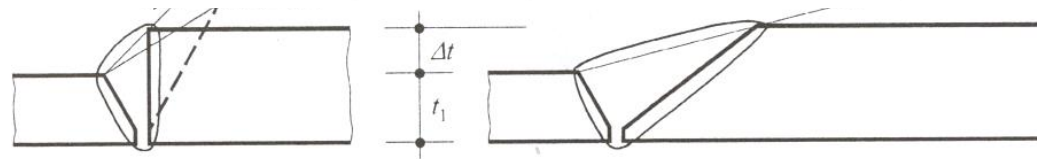


Rys: Autor

# Spoiny czołowe - geometria

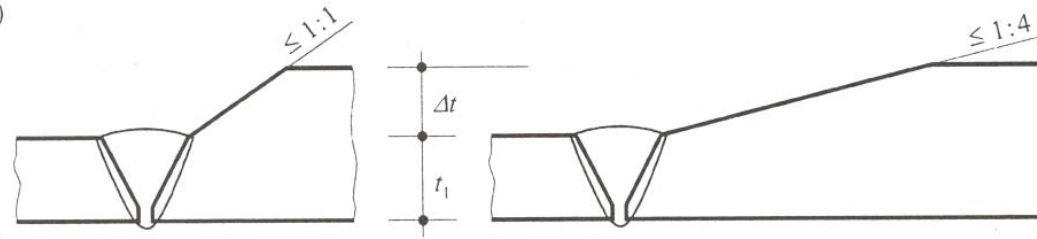
Obciążenia statyczne

Obciążenia dynamiczne



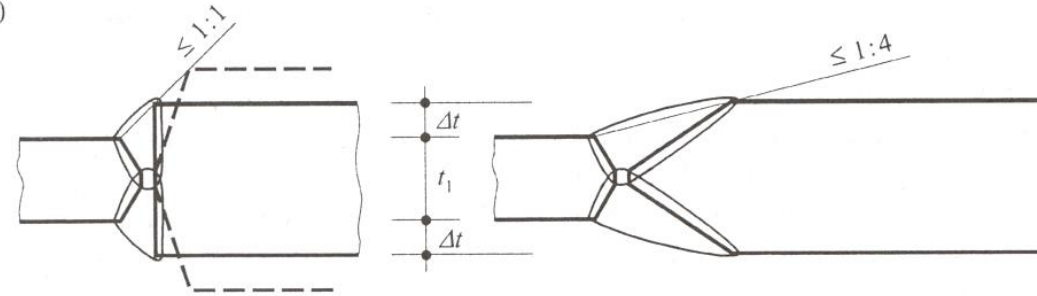
$$\Delta t \leq t_1, \Delta t \leq 10 \text{ mm}$$

b)



$$\Delta t \leq t_1, \Delta t > 10 \text{ mm}$$

c)

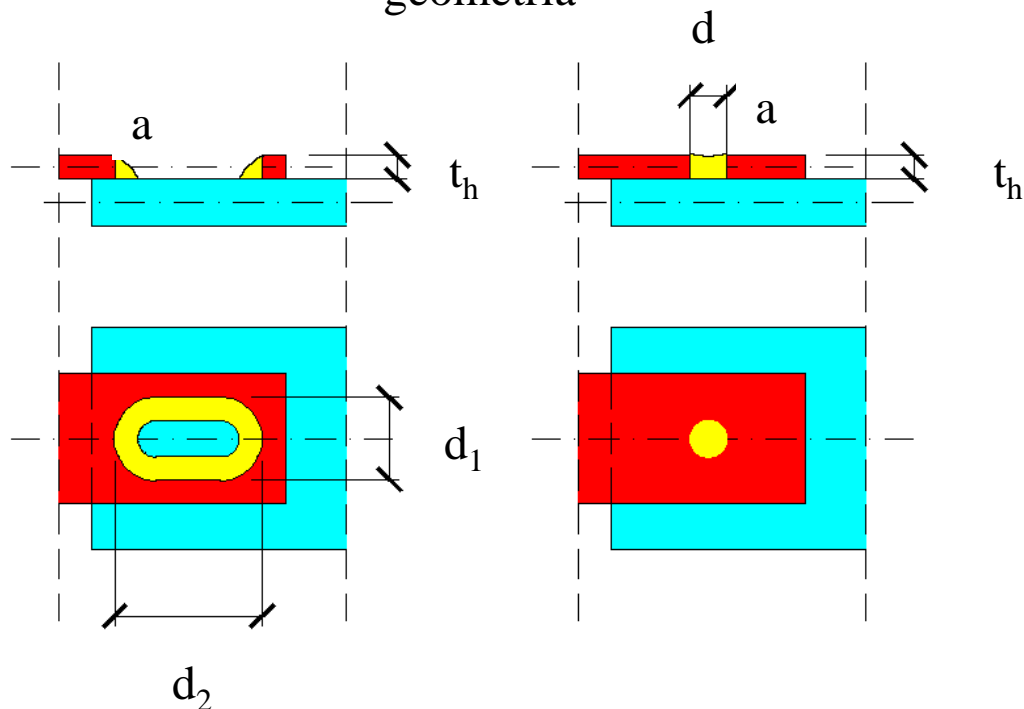


$$\Delta t \leq t_1, \Delta t \leq 10 \text{ mm}$$

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

## Spoiny pachwiniowe obwodowe i otworowe - geometria

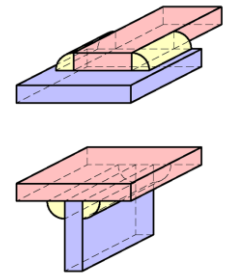
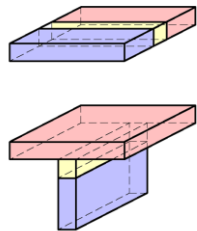
Rys: Autor



EN 1993-1-8  
4.3.3  
4.3.5

Wymiary	Spoiny pachwiniowe obwodowe	Spoiny otworowe
$\min (d ; d_1 ; d_2)$	$> 4 t_h$	$> t_h + 8\text{mm}$
$a$	$\rightarrow$ pachwinowe	$= t_h \quad (t_h < 16 \text{ mm})$ $= \max (16\text{mm}; t_h / 2) \quad (t_h > 16 \text{ mm})$

## Porównanie



Spoiny czołowe	Spoiny pachwinowe
<p>Nie oblicza się nośności spoin; przyjmuje się ją równą nośności słabszego elementu</p>	<p>Należy policzyć nośność spoiny; jest różna od nosności łączonych elementów</p>
<p>Możliwe tylko dla niektórych wzajemnych położenia blach i elementów (np. niemożliwe dla połączenie półki i nakładki)</p>	<p>Możliwe dla każdego wzajemnego położenia blach i elementów</p>
<p>Mogą być potrzebne dodatkowe przygotowania elementów (np. ukosowanie)</p>	<p>Nie są potrzebne dodatkowe przygotowania elementów</p>

Rys: autor

## Wymagania i zalecenia

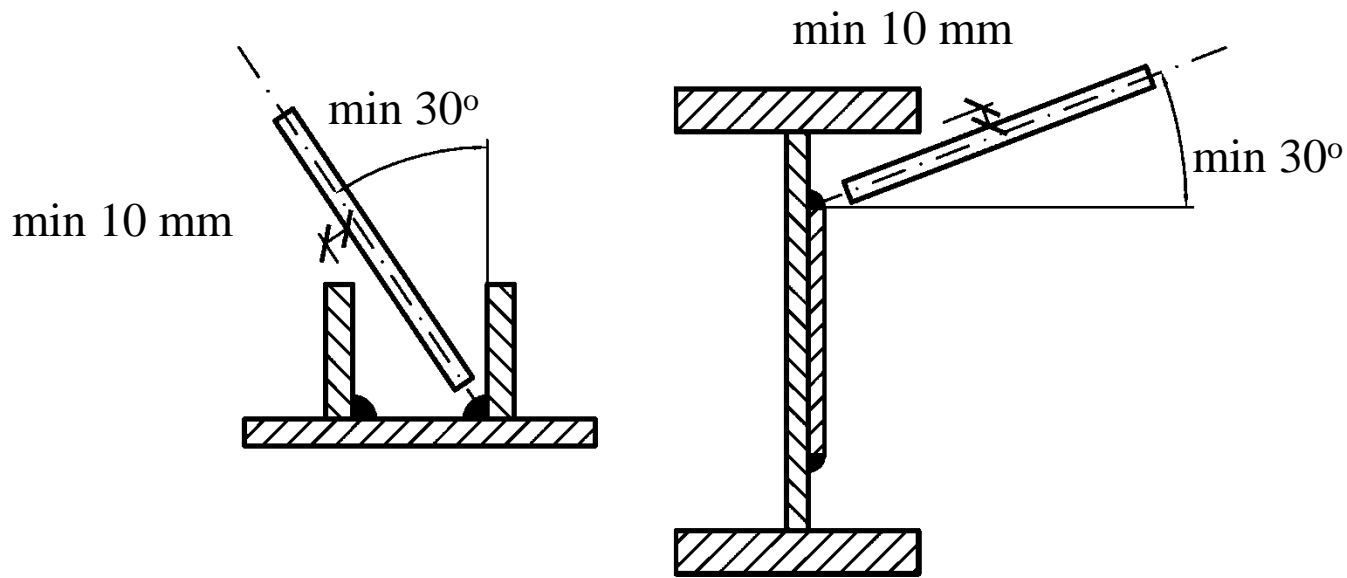
Powierzchnie:

- Odtłuszczone
- Suche
- Bez korozji
- Bez zabezpieczeń antykorozyjnych
- Bez powłok malarskich
- Bez pęknięć

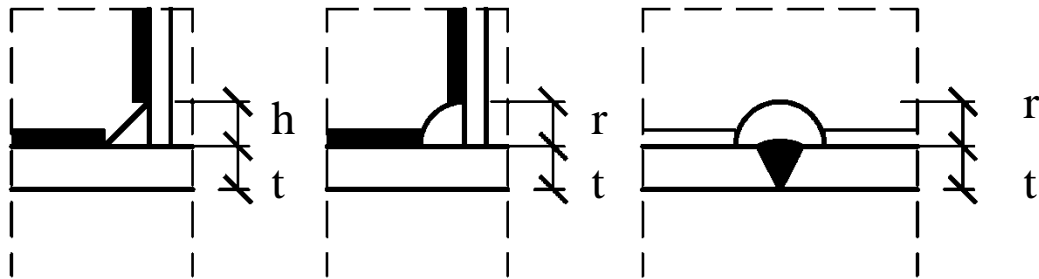
Spieczone zanieczyszczenia i powłoki malarskie tworzą wtrącenia żużlowe w spoinie

Pęknięcie spoin oznacza zniszczenie połączenia; pęknięcie w elemencie spowoduje pęknięcie spoiny.

Rozkład termiczny wody jest źródłem wodoru. Pęknięcie wodorowe jest jednym z wielu rodzajów niszczenia spoin.

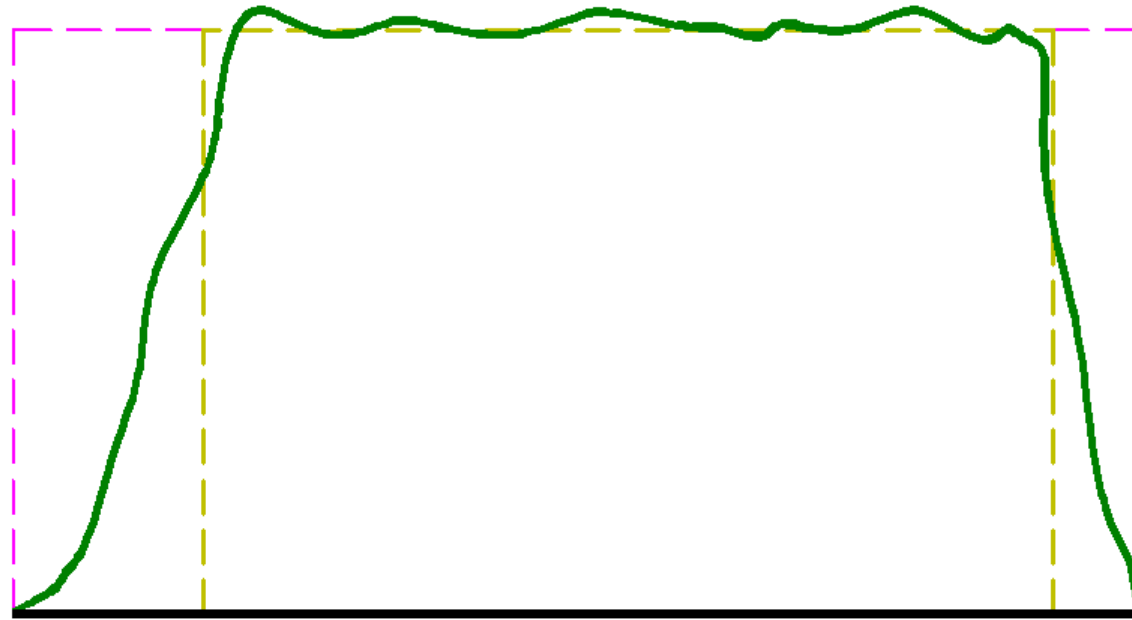


Rys: Autor



$$h \geq 25 \text{ mm}; h \geq 3 t$$

$$r \geq 25 \text{ mm}; r \geq 3 t$$



Część początkowa –  
rozruch spawarki

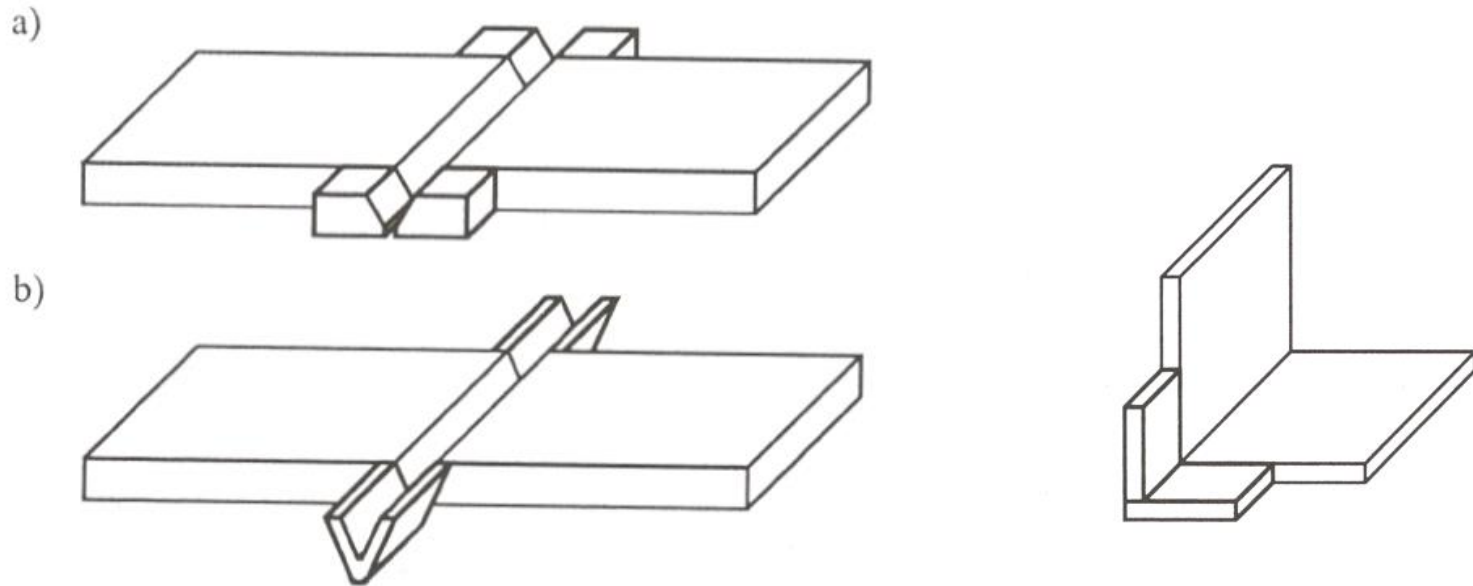
Rys: Autor

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

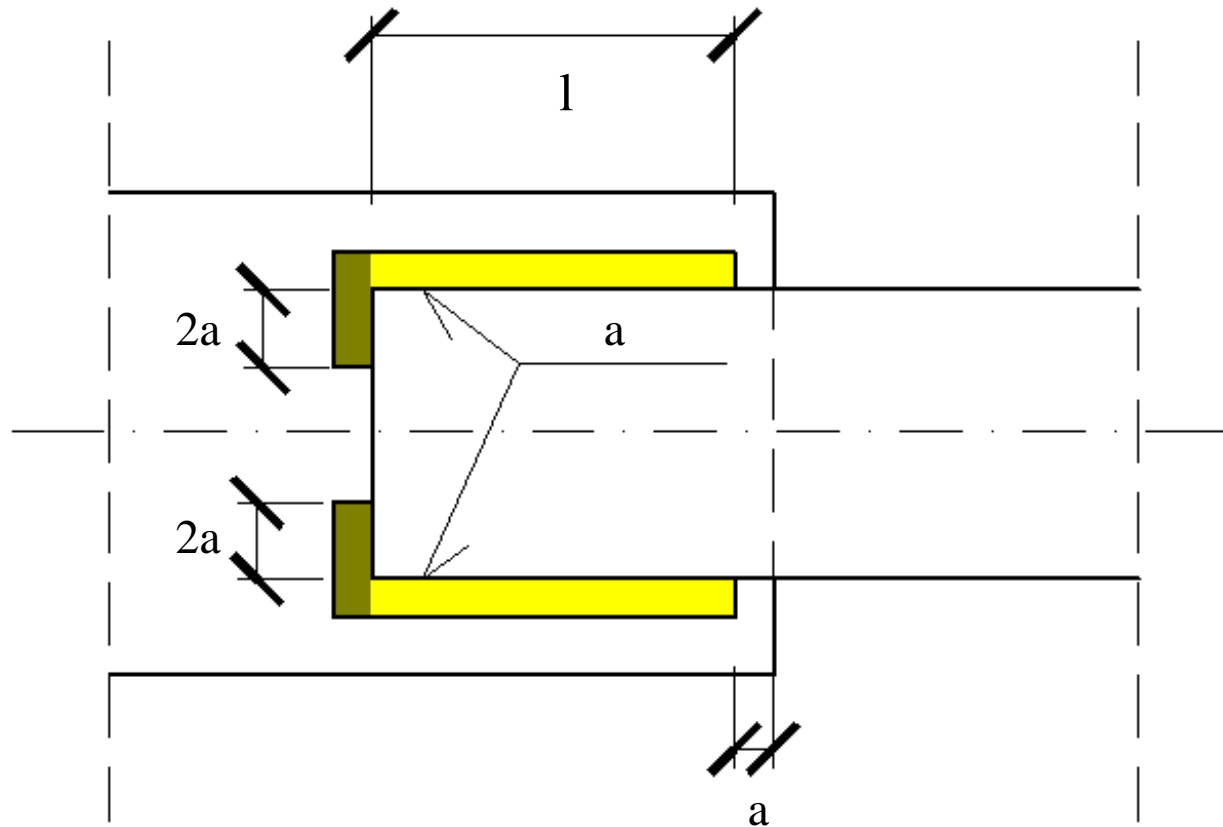


Rys: Konstrukcje stalowe, K. Rykaluk, Dolnośląskie  
Wydawnictwo Edukacyjne Wrocław 2001

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

## Spoiny pachwinowe – długość obliczeniowa bez płytek wybiegowych

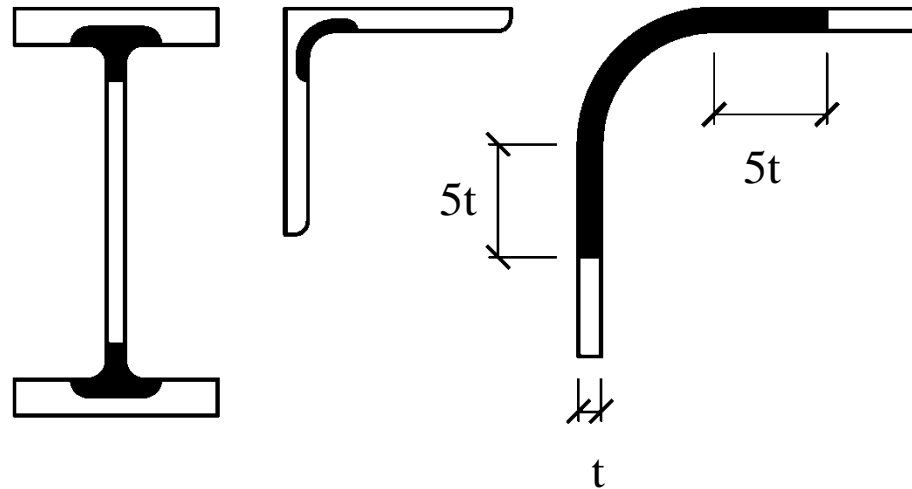
Rys: Autor



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

## Ograniczenia

Powinniśmy unikać spoin w „czułych” częściach przekrojów.



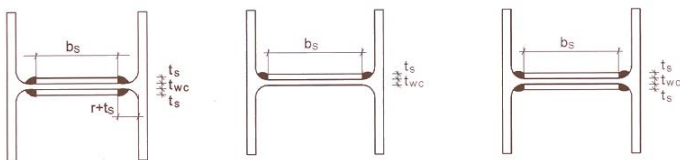
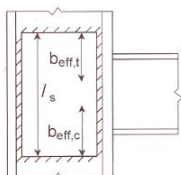
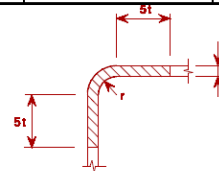
Rys: Autor

Dla przekrojów zimnogiętych spawanie w narożnikach możliwe jest tylko w przypadku spełnienia odpowiednich warunków

(EN 1993-1-8 tab. 4.2):

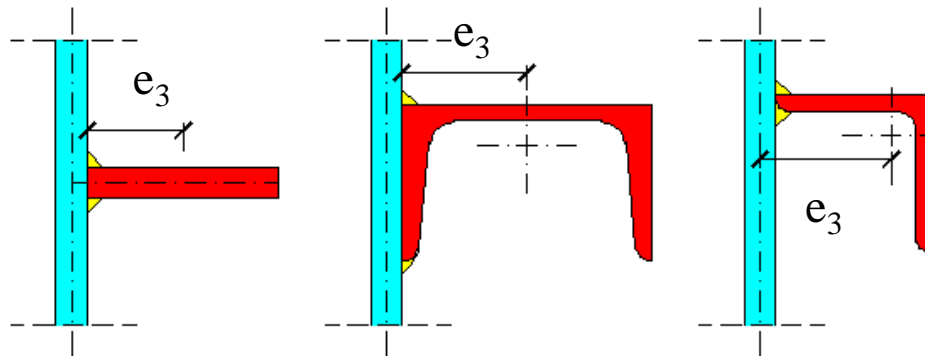
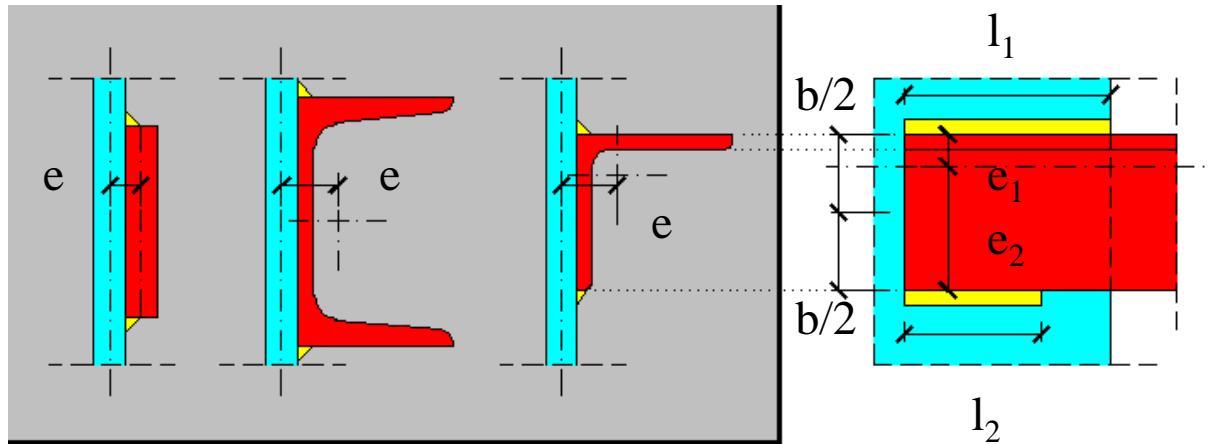
Tablica 4.2: Warunki spawania w pobliżu stref zgiętu

r/t	Wydluzenie przy formowaniu na zimno (%)	Największa grubość (mm)		
		Ogólnie		Stal uspokojona całkowicie (Al ≥ 0,02 %)
		Obciążenie przeważająco statyczne	Obciążenie zmęczeniowe	
≥ 25	≤ 2	dowolna	dowolna	dowolna
≥ 10	≤ 5	dowolna	16	dowolna
≥ 3,0	≤ 14	24	12	24
≥ 2,0	≤ 20	12	10	12
≥ 1,5	≤ 25	8	8	10
≥ 1,0	≤ 33	4	4	6



Wzmocnienie środnika w węźle rygiel-słup – spoiny w narożnikach dwuteownika mogą być brane pod uwagę (EN 1993-1-8 rys. 6.5).

# Mimośrodry

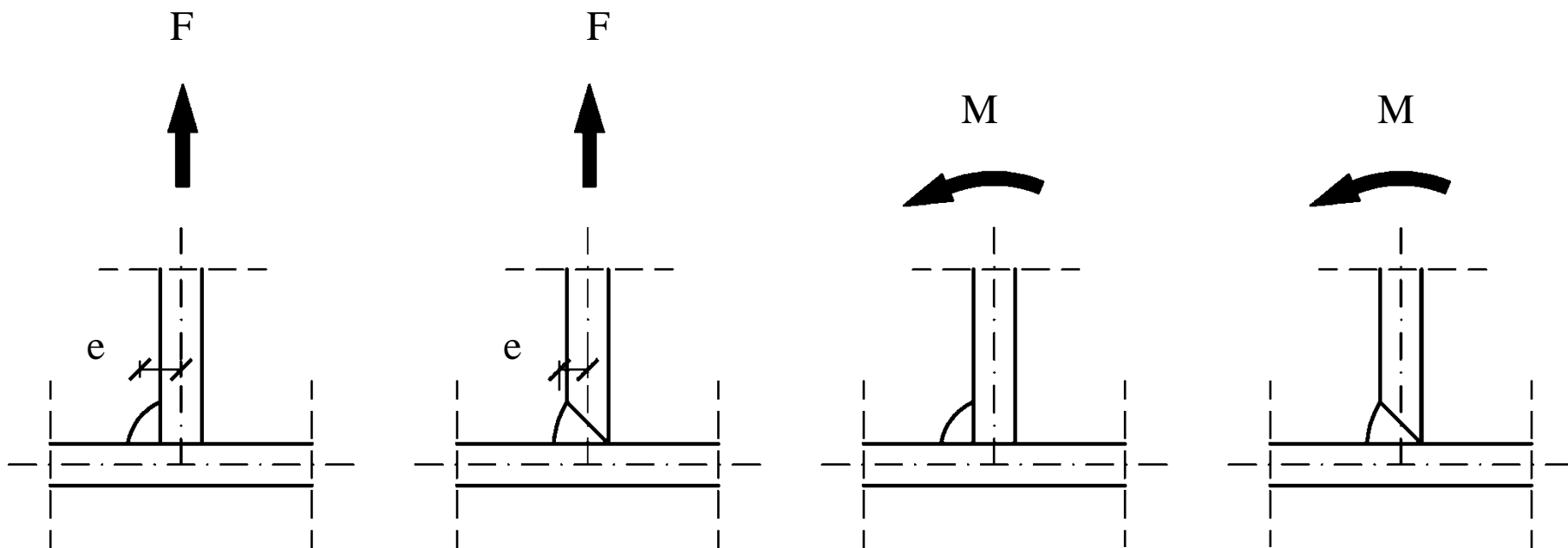


Rys: Autor

$e$  mogą być pominięte w obliczeniach

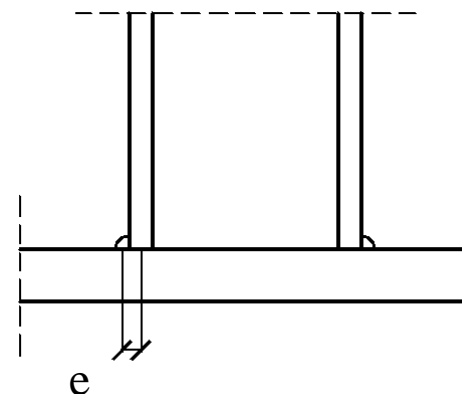
$e_1$  ,  $e_2$  ,  $e_3$  muszą zostać uwzględnione → dodatkowe momenty zginające

Mimośrodki muszą być wzięte pod uwagę gdy obciążenie wywołuje rozciąganie w grani spoiny.



Rys: Autor

Mimośrodki mogą zostać pominięte gdy spoina jest częścią grupy spoin na obwodzie kształtownika rurowego.



## Pękanie stali

Znamy wiele rodzajów pęknięcia stali. Niektóre rodzaje związane są bezpośrednio lub pośrednio z procesem spawania.

Główne pojęcie związane z pękaniem spoin: spawalność stali

Czas pęknięcia		Rodzaj pęknięć
Przed rozpoczęciem eksploatacji (technologiczne)	Przygotowanie do spawania	Pękanie relaksacyjne;
	Podczas spawania	Pękanie na gorąco; Pękanie lamelarne;
	Po zakończeniu spawania	Pękanie relaksacyjne; Pękanie na zimno;
W czasie eksploatacji	Związane ze spawaniem	Pękanie zmęczeniowe; Pękanie wodorowe;
	Nie związane ze spawaniem	Pękanie wodorowe; Pękanie kruche; Przełom plastyczny;

Nie ma jasnych wytycznych na temat obliczeń i unikania pęknięcia. W literaturze spotkać można wiele modeli obliczeniowych różnych typów pęknięcia.

Problem	Obliczenia		Uwagi
	wg literatury	wg norm	
Spawalność		EN 1011-2	#t / 41-44
Pęknięcie relaksacyjne	+		#t / 45
Pęknięcie na gorąco	+		#t / 46
Pęknięcie lamelarne		EN 1993-1-10 EN 10 164	#t / 47-50
Pęknięcie na zimno	+		#t / 51
Pęknięcie zmęczeniowe		EN 1993-1-9	#t / 52-59
Pęknięcie wodorowe	+		#t / 60
Krucze pęknięcie		EN 1993-1-10	#t / 61-63
Przełom plastyczny	$E / R \leq 1,0$		#t / 64

## Przykład składu chemicznego kilku gatunków stali:

→ #2 / 88

Stal	C [%]			Si <sub>max</sub> [%]	Mn <sub>max</sub> [%]	P <sub>max</sub> [%]	S <sub>max</sub> [%]	N <sub>max</sub> [%]	Cu <sub>max</sub> [%]
	t ≤ 16 mm	16 < t ≤ 40 mm	t > 40 mm						
S235 JR	0,170	0,170	0,200	0,000	1,400	0,035	0,035	0,012	0,550
S235 J0	0,170	0,170	0,170	0,000	1,400	0,030	0,030	0,012	0,550
S235 J2	0,170	0,170	0,170	0,000	1,400	0,025	0,025	0,000	0,550
S275 JR	0,210	0,210	0,220	0,000	1,500	0,035	0,035	0,012	0,550
S275 J0	0,180	0,180	0,180	0,000	1,500	0,030	0,030	0,012	0,550
S275 J2	0,180	0,180	0,180	0,000	1,500	0,025	0,025	0,000	0,550
S355 JR	0,240	0,240	0,240	0,550	1,600	0,035	0,035	0,012	0,550
S355 J0	0,200	0,200	0,220	0,550	1,600	0,035	0,035	0,012	0,550
S355 J2	0,200	0,200	0,220	0,550	1,600	0,030	0,030	0,000	0,550

→ #2 / 84

## Spawalność

Zdolność do bycia łączonym przez spawanie

Równoważnik węglowy:

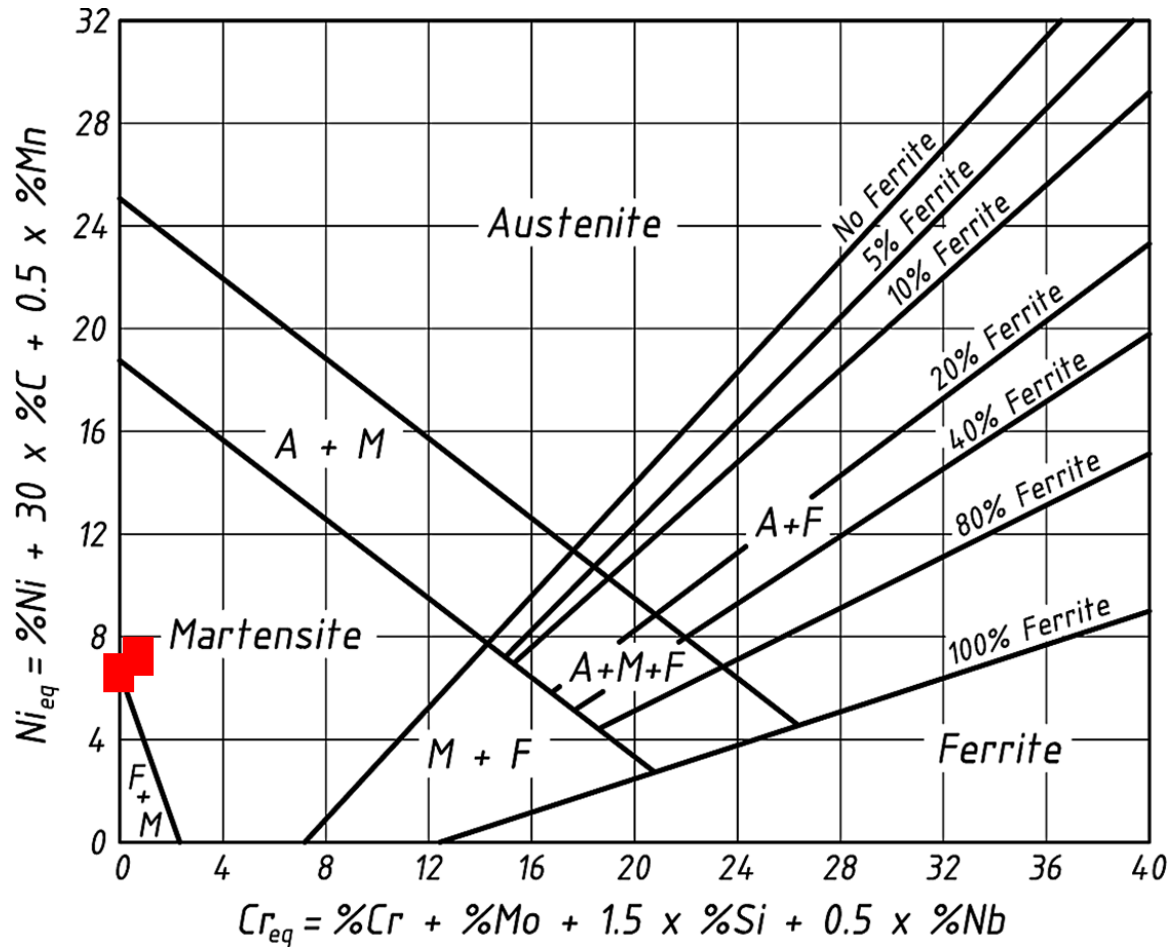
$$C_E = C + (Cr + V + Mo) / 5 + Mn / 6 + (Ni + Cu) / 15$$

$C_E < 0,42\%$  dobra spawalność

$0,42\% < C_E < 0,60\%$  średnia spawalność

$C_E > 0,60\%$  zła spawalność

Więcej informacji → wykład #16



**Skład chemiczny stali S235, S275 i S355** sytuuje je w grupie stali martenzytycznych. Oznacza to potencjalnie wysoką tendencję do przemiany martenzytycznej i problemów ze spawalnością.

Rys: I. Tylek, K. Kuchta, Physical and technological properties of structural stainless steel, Technical Transactions 4-B / 2014

$$C_E = C + (Cr + V + Mo) / 5 + Mn / 6 + (Ni + Cu) / 15$$

Stal	$t \leq 16 \text{ mm}$	$16 < t \leq 40 \text{ mm}$	$t > 40 \text{ mm}$
S235 JR	$0,170 + 1,400 / 6 + 0,550 / 15 = \mathbf{0,440}$		$0,220 + 1,400 / 6 + 0,550 / 15 = \mathbf{0,490}$
S235 J0	$0,170 + 1,400 / 6 + 0,550 / 15 = \mathbf{0,440}$		
S235 J2	$0,170 + 1,400 / 6 + 0,550 / 15 = \mathbf{0,440}$		
S275 JR	$0,210 + 1,500 / 6 + 0,550 / 15 = \mathbf{0,497}$		$0,220 + 1,500 / 6 + 0,550 / 15 = \mathbf{0,507}$
S275 J0	$0,180 + 1,500 / 6 + 0,550 / 15 = \mathbf{0,467}$		
S275 J2	$0,180 + 1,500 / 6 + 0,550 / 15 = \mathbf{0,467}$		
S355 JR	$0,240 + 1,600 / 6 + 0,550 / 15 = \mathbf{0,543}$		
S355 J0	$0,200 + 1,600 / 6 + 0,550 / 15 = \mathbf{0,503}$		
S355 J2	$0,200 + 1,600 / 6 + 0,550 / 15 = \mathbf{0,503}$		

$0,42\% < C_E < 0,60\%$  średnia spawalność

## Zapobieganie:

wstępne nagrzanie ( $T_W$ ) (nie zawsze możliwe);

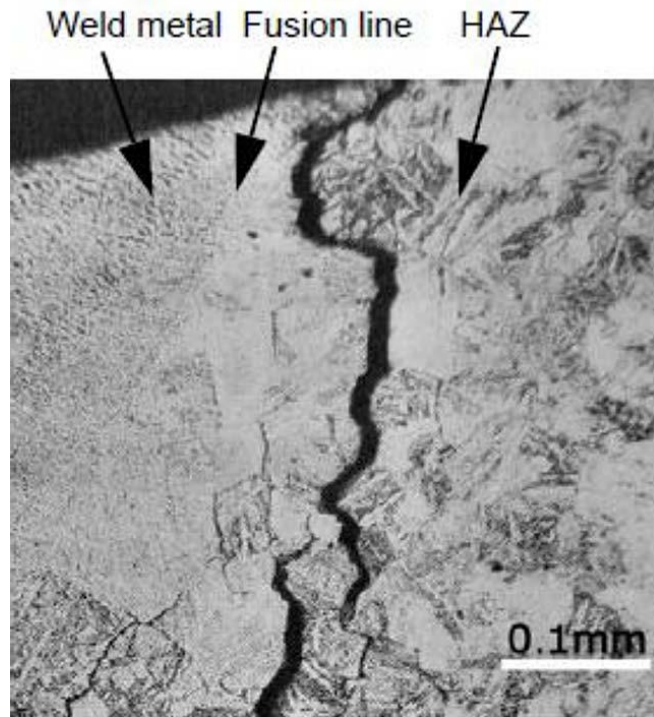
obróbka cieplna po spawaniu (nie zawsze możliwa);

$$T_W = 350 \{ [1 + 0,005 t / (1\text{mm})] C_E - 0,25 \}^{0,5} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

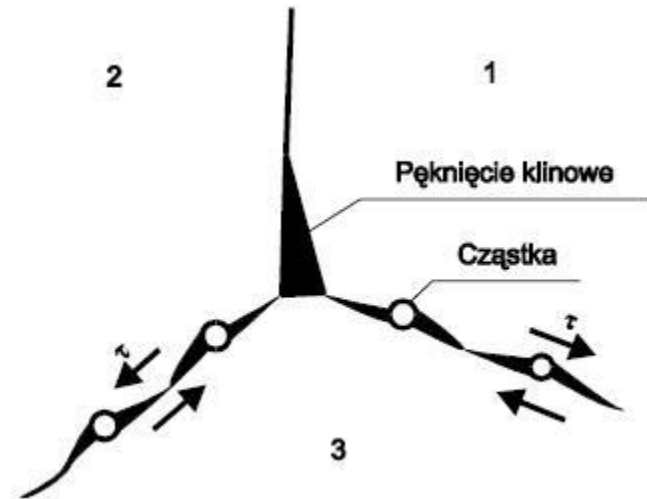
Około 160-230 °C w powyższych przypadkach

## Pękanie relaksacyjne

Naprężenia termiczne podczas wstępnego ogrzewania lub ulepszenia cieplnego po spawaniu, nakładające się na rekrystalizującą spoinę; pomiędzy mikrokryształkami powstają szczeliny w których wydzielają się węgliki. Prowadzi to do utwardzenia granicy ziaren, wzrostu kruchości i pęknięcia. Przypadek, w którym należy bliżej przyjrzeć się wpływowi technologii spawania na rekrystalizację.



Rys: weldingengineers.co.nz

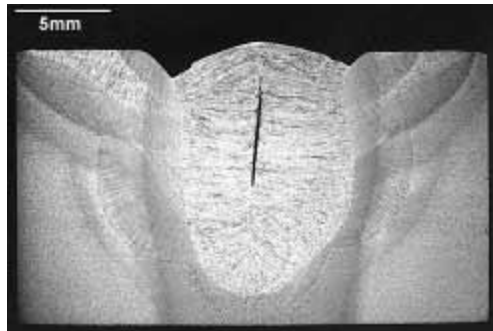


Rys: spawalnictwo.blogspot.com

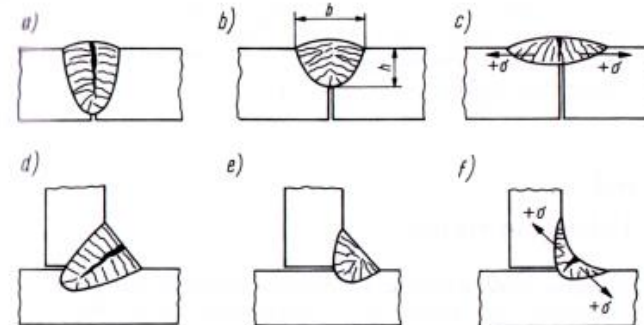
Najbardziej wrażliwa jest stal S355

## Pękanie na gorąco

Naprężenia termiczne podczas spawania, „zamrożone” w krzepnącym materiale. Tutaj również należy bliżej przyjrzeć się wpływowi technologii spawania na rekrystalizującą spoinę.



Rys: twi-global.com

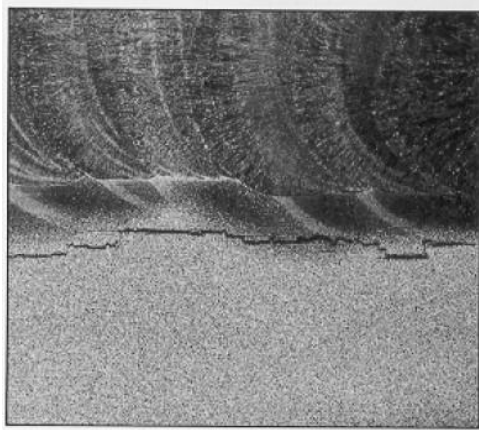


Rys: K. Ferenc, J. Ferenc, Konstrukcje spawane, połączenia, WNT 2003

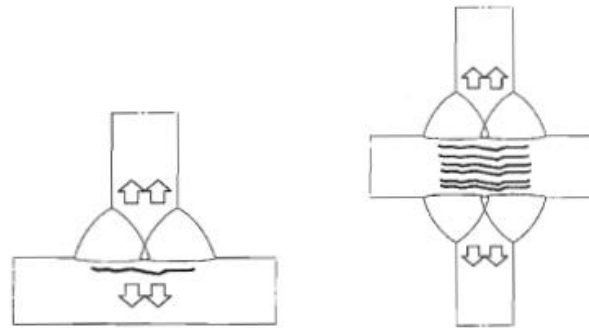
Najbardziej wrażliwa jest stal S355

## Pękanie lamelarne

Zanieczyszczenia; głównie siarczki i wodór + deformacje termiczne. Opisane w normach EN 1993-1-10 oraz EN 10 164. Eurokod 1993-1-10 nakłada ograniczenia na dopuszczalną grubość spawanych elementów w celu ograniczenia ryzyka pęknięcia lamelnego.



Rys: pipingengineer.org



Rys: EN 1993-1-10

Najbardziej wrażliwa jest stal S355

# Pękanie lamelarne

## obliczenia według norm EN 1993-1-10 oraz EN 10 164

Wzór ogólny  
(EN 1993-1-10 (3.1):

$$Z_{Ed} = Z_a + Z_b + Z_c + Z_d + Z_e \leq Z_{Rd}$$

$Z_a$  – wpływ głębokości spoiny (EN 1993-1-10 tab 3.2);

$Z_b$  – kształt i usytuowanie spoiny (EN 1993-1-10 tab 3.2);

$Z_c$  – grubość materiału (EN 1993-1-10 tab 3.2);

$Z_d$  – ograniczenie skurczu (EN 1993-1-10 tab 3.2);

$Z_e$  – wpływ podgrzewania (EN 1993-1-10 tab 3.2);

$Z_{Rd}$  – klasa jakości (EN 10 164 tab 1); wartości: 15 lub 25 lub 35

Informacja o klasie jakości podawana jest w czwartym bloku symboli stali

Oznaczenia stali

A	B	C	D
---	---	---	---

A:

S – stal konstrukcyjna

L – rury dla rurociągów

B – stal zbrojeniowa

G - żeliwo

C:

Podgatunek; dla stali konstrukcyjnej  
wynik testu Charpy'ego

B:

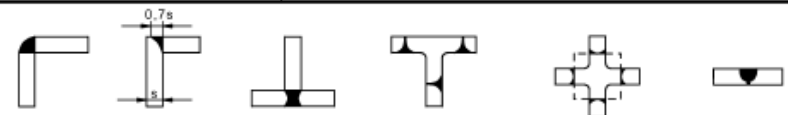
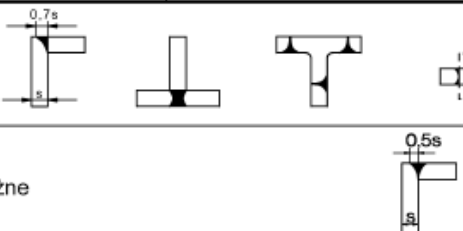





Gatunek stali =  $f_y$  [MPa]Na przykład 235 →  $f_y = 235$  [MPa]

D:

Dodatkowe informacje; dla stali  
konstrukcyjnej parametry obróbki  
w procesie stalowniczym

Przykład:

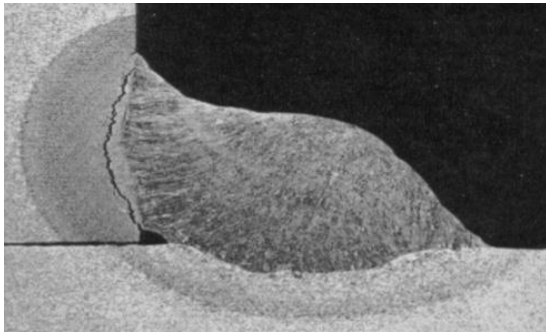
S 235 JR G2

		$30 < a_{\text{eff}} \leq 40\text{mm}$	$a = 28\text{ mm}$	$Z_a = 12$
		$40 < a_{\text{eff}} \leq 50\text{mm}$	$a = 35\text{ mm}$	$Z_a = 15$
		$50 < a_{\text{eff}}$	$a > 35\text{ mm}$	$Z_a = 15$
b)	Kształt i usytuowanie spoiny w złączach teowym krzyżowym i narożnym			$Z_b = -25$
		Złącza narożne		$Z_b = -10$
		Spoiny pachwinowe jednościgowe $Z_a = 0$ lub pachwinowe $Z_a > 1$ z buforowaniem stopiwn o małej wytrzymałości		$Z_b = -5$
		Wielościęgowe spoiny pachwinowe		$Z_b = 0$
		Spoiny z pełnym i niepełnym przetopem	z odpowiednią kolejnością spawania dla zmniejszenia skurczu 	$Z_b = 3$
		Spoiny z pełnym i niepełnym przetopem		$Z_b = 5$
		Złącza narożne		$Z_b = 8$
c)	Wpływ grubości materiału s na ograniczenie skurczu	$s \leq 10\text{mm}$		$Z_c = 2^*$
		$10 < s \leq 20\text{mm}$		$Z_c = 4^*$
		$20 < s \leq 30\text{mm}$		$Z_c = 6^*$
		$30 < s \leq 40\text{mm}$		$Z_c = 8^*$
		$40 < s \leq 50\text{mm}$		$Z_c = 10^*$
		$50 < s \leq 60\text{mm}$		$Z_c = 12^*$
		$60 < s \leq 70\text{mm}$		$Z_c = 15^*$
		$70 < s$		$Z_c = 15^*$
d)	Odległe ograniczenie	Słabe ograniczenie: Skurcz swobodny możliwy (np. złącza T)		$Z_d = 0$

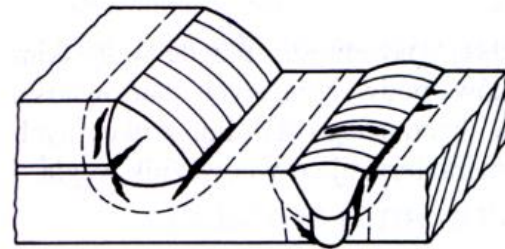
Rys: EN 1993-1-10 tab 3.2

## Pękanie na zimno

Pojawienie się nieulepszzonego cieplnie (kruchego) martenzytu jako skutek spawania + obecność wodoru w spoinie; pęknięcia pojawiają się ok. 48h po spawaniu.



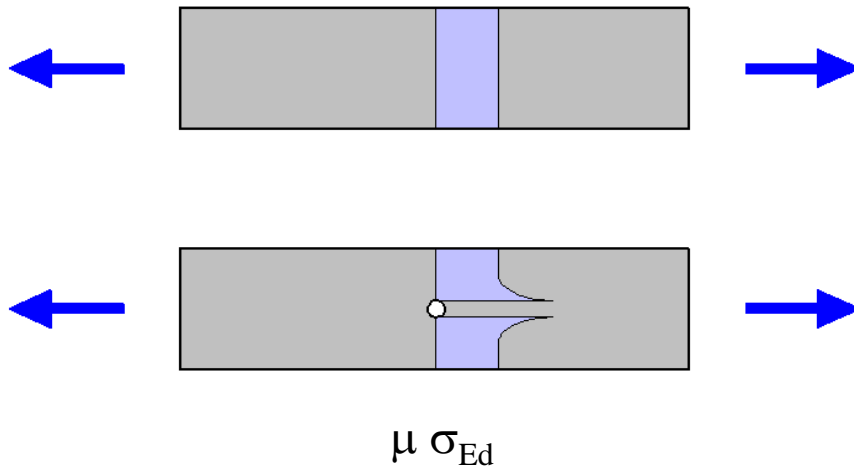
Rys: welderdestiny.com



Rys: K. Ferenc, J. Ferenc, Konstrukcje spawane, połączenia, WNT 2003

Najbardziej wrażliwa jest stal S355

## Pękanie zmęczeniowe obciążenia dynamiczne



Efektom spawania jest spora ilość mikroimperfekcji (pęcherzyki gazu, wtrącenia, mikropęknięcia itp), które nie występują w materiale rodzimym. Każda taka imperfekcja jest karbem, wokół którego dochodzi do koncentracji

$\mu$  współczynnik koncentracji naprężeń  
 $\sigma_{Ed}$  naprężenie dla przekroju bez imperfekcji



Wartość  $\mu \sigma_{Ed}$  może okazać się większa od wytrzymałości stali. Dochodzi do sukcesywnego rozrywania materiału i powiększania się imperfekcji. Przy dużej ilości cykli obciążeń, imperfekcja powiększa się i dochodzi do zniszczenia elementu.

Rys: Autor

## Wytrzymałość zmęczeniowa

amplituda lub ilość cykli obciążenia zmiennego, które może być zastosowane bez zniszczenia materiału

**To nie to samo co wytrzymałość materiału**

Wytrzymałość → obciążenia statyczne

Wytrzymałość zmęczeniowa → obciążenia cykliczne (dynamiczne)

Cecha ważna w przypadku konstrukcji narażonych na obciążenia dynamiczne i cykliczne.

Nawet niewielkiej wartości obciążenie, za to cyklicznie powtarzane ( $> 10\ 000$ ) może doprowadzić do zniszczenia konstrukcji.

→ #2 / 78

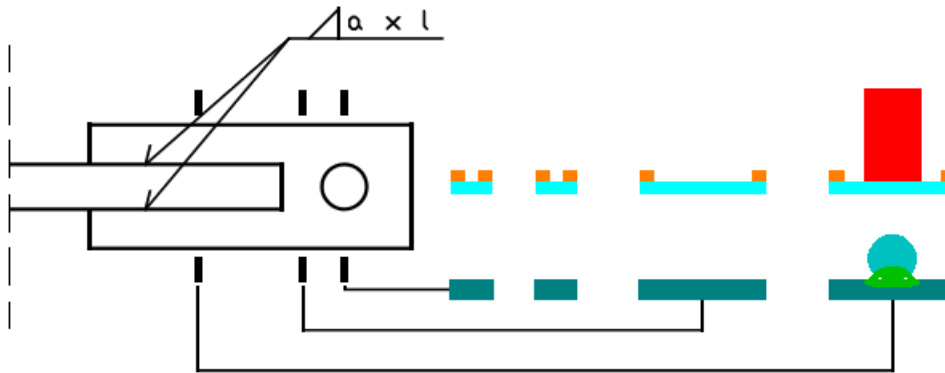


Rys: scottmetals.com.au

## Pręt stężenia z blachą węzłową



Rys: autor



Rys: autor

→ #6 / 30

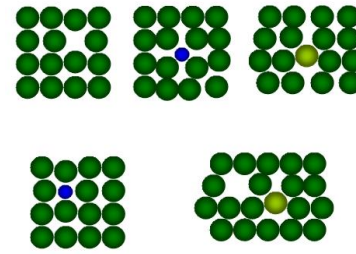
Oszacowanie średniej ilości imperfekcji w przekroju blachy:

„zwykłe” imperfekcje wewnętrzne w blasze

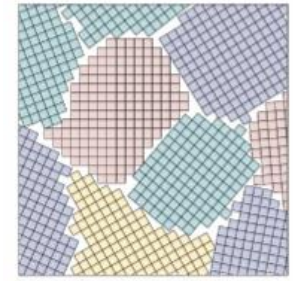
efekt obróbki (cięcie blachy, wykonanie otworów...)

efekt spawania

## Imperfekcje wewnętrzne w blasze (#6 / 12 - 17)



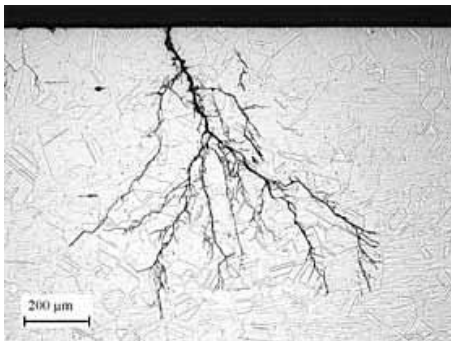
Rys: wikipedia



Rys: zasoby.open.agh.edu.pl

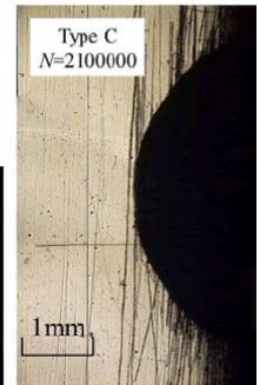
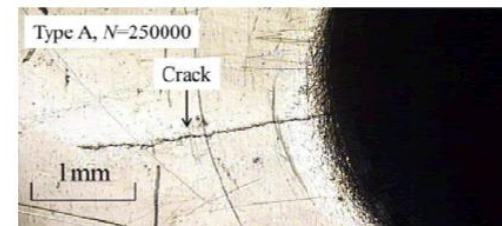
**Dodatkowe imperfekcje związane z obróbką mechaniczną (#6 / 18 – 25):** odkształcenia plastyczne, lokalne utwardzenie (deformacja kryształów), lokalne pękanie (twardość  $\uparrow \rightarrow$  kruchość  $\uparrow \rightarrow$  udarność  $\downarrow$ ) – zjawiska brane pod uwagę przy analizie zmęczeniowej (więcej informacji Wyk #16).

$\rightarrow$  #6 / 31

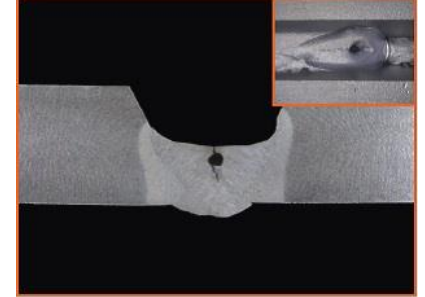
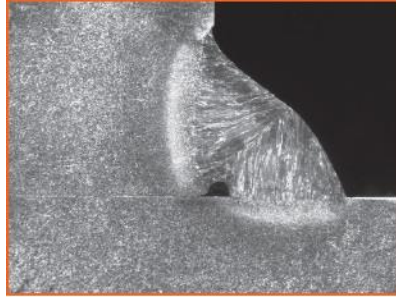


Rys: twi-global.com

Rys: omicsonline.org



**Imperfekcje spawalnicze (#6 / 26-29):** wtórne zanieczyszczenia (pęcherzyki gazu, wtrącenia żużlu) wprowadzone do spoiny, lokalne odkształcenia, pęknięcie na skutek naprężeń termicznych...



Rys: figel.pl

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

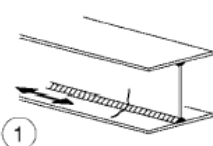
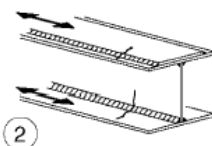
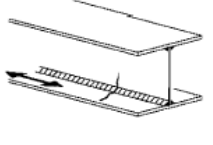
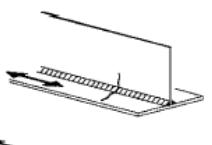
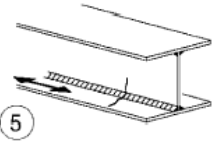
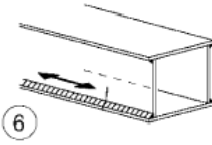
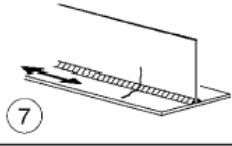
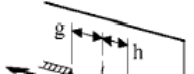
→ #6 / 32

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

# Pękanie zmęczeniowe

## Obliczenia

W EN 1993-1-9 w tablicach 8.2 - 8.10 przedstawione są wszystkie rodzaje spoin. Pierwsza kolumna w tabeli to wytrzymałość zmęczeniowa w [MPa].

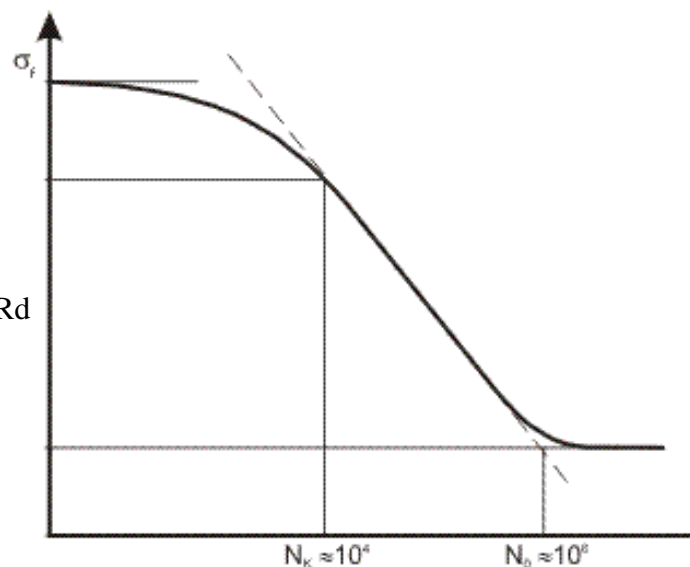
125	 	<p>1) Spoiny czołowe wykonywane automatycznie obustronnie.</p> <p>2) Spoiny pachwinowe wykonane automatycznie. Sprawdzenie nakładek – wg Tablicy 8.5, jak w przypadku elementu 6) lub 7).</p>	<p>Nie dopuszcza się kraterów, chyba że naprawę powierza się specjalistom<sup>(N5)</sup>, a jej efekt podlega kontroli.</p>
112	 	<p>3) Spoiny czołowe lub pachwinowe wykonane automatycznie z obu stron, zawierające krater.</p> <p>4) Spoiny czołowe wykonywane automatycznie jednostronnie na ciągłej podkładce bez kraterów.</p>	<p>4) Gdy w złączeniu występują krater, przyjmuje się kategorię 100.</p>
100	 	<p>5) Ręcznie wykonywane spoiny pachwinowe lub czołowe.</p> <p>6) Ręcznie lub automatycznie wykonane spoiny czołowe jednostronnie, w szczególności w dźwigarach skrzynkowych</p>	<p>5), 6) Bardzo dobre dopasowanie pasa i środka ma zasadnicze znaczenie. Brzeg środka powinien być tak przygotowany, aby próg spawania umożliwił uzyskanie regularnego przetopu bez przerw.</p>
100		<p>7) Naprawiane automatycznie lub ręcznie spoiny pachwinowe lub czołowe w elementach od 1) do 6).</p>	<p>7) Usunięcie widocznych niezgodności przez specjalistę drogą szlifowania i przeprowadzenie odpowiedniej kontroli może być podstawą do zachowania pierwotnej kategorii.</p>
RN		<p>8) Przerwane podłużne spoiny pachwinowe.</p>	<p>8) Zakres <math>\Delta\sigma</math> oblicza się na podstawie naprężeń normalnych w pasie.</p>

Nośność zmęczeniowa  $\Delta\sigma_{Rd}$  zależy od liczby cykli obciążenia. Maleje wraz ze wzrostem liczby cykli.

W obliczeniach uwzględnia się całkowitą amplitudę naprężeń  $\Delta\sigma_{Ed}$ , wywołaną cyklem obciążenia.

$$\Delta\sigma_{Ed} / \Delta\sigma_{Rd} \leq 1,0$$

Nośność zmęczeniowa  $\Delta\sigma_{Rd}$



Rys: Autor

Liczba cykli

Więcej informacji będzie przedstawione na II stopniu studiów.

## Wpływ obciążeń dynamicznych i cyklicznych:

### Konstrukcje niespawane



Nośność zmęczeniowa wynika wyłącznie z cięcia elementów i wiercenia otworów



EN 1993-1-9, tab 8.1, 8.10

### Konstrukcje spawane



Poziom imperfekcji **poniżej** akceptowanego przez EXC (wyk #6 / 47-58)



Nośność zmęczeniowa wynika z cięcia elementów, wiercenia otworów i spawania



EN 1993-1-9, tab 8.1 – 8.10  
(wytrzymałość zmęczeniowa w spoinach jest niższa niż w elementach)



Poziom imperfekcji **powyżej** akceptowanego przez EXC (wyk #6 / 47-58)



**Spoiny muszą być usunięte i wykonane jeszcze raz**  
(Zawsze, nie tylko w przypadku obciążeń dynamicznych i cyklicznych)

## Pękanie wodorowe

Ogólna nazwa pękań, będących efektem obecności wodoru w spoinie. Mechanizm rozrostu pęknięć w obecności wodoru nie jest całkiem jasny. Istnieje wiele różnych modeli, opisujących to zjawisko.

Źródłem wodoru mogą być:

- zanieczyszczenia z procesu wielkopiecowego lub stalowniczego;
- zawilgocenie elektrod;
- niedokładne osuszenie spawanych powierzchni;
- wodór ze spawania gazowego;
- zanieczyszczenia chemiczne w okresie eksploatacji;

Zabezpieczeniem jest przestrzeganie technologii spawalniczej (suche elementy i elektrody) i zabezpieczenie antykorozyjne w czasie eksploatacji.

Najbardziej wrażliwa jest stal S355

## Krucze pękanie

Efekt obecności zanieczyszczeń (głównie P, N, S) w stali. Te pierwiastki chemiczne sprzyjają korozji i zwiększają kruchość. Krucze pękanie jest bardzo niebezpieczne – w przeciwieństwie do „zwykłego” zniszczenia konstrukcji (poprzedzonego zauważalnymi deformacjami), następuje bez żadnych sygnałów ostrzegawczych.

Podatność na krucze pękanie bada się młotem Charpy’ego.

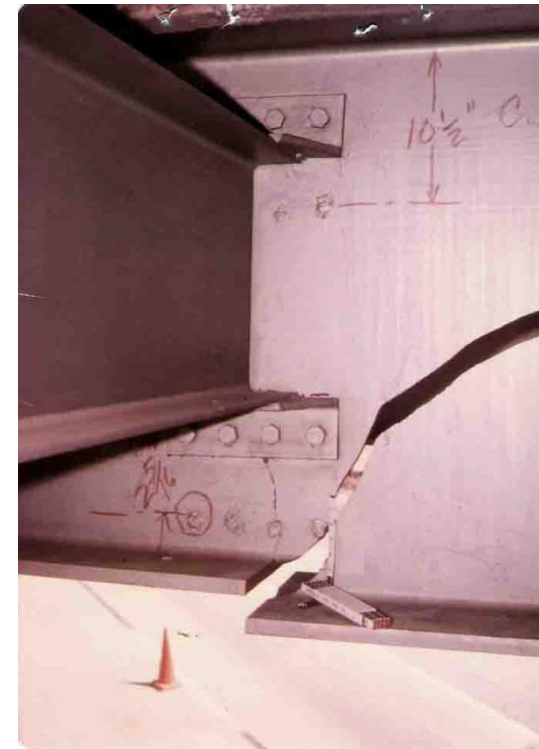
Podatność na krucze pękanie rośnie wraz ze:

- ↓ temperatura;
- ↑ naprężenia;
- ↑ grubość elementu;

## Dlaczego udarność jest ważna?



Rys: inspectioneering.com



Rys: rebar.ecn.purdue.edu



Rys: civildigital.com

Wynik badania młotem Charpy'ego pokazuje skłonność różnych gatunków stali do kruchego pęknięcia w niskich temperaturach. Kruche pęknięcie następuje bez wcześniejszych oznak ostrzegawczych.

→ #2 / 71

Niskie temperatury + duże wartości naprężeń → ograniczenie maksymalnej grubości elementów

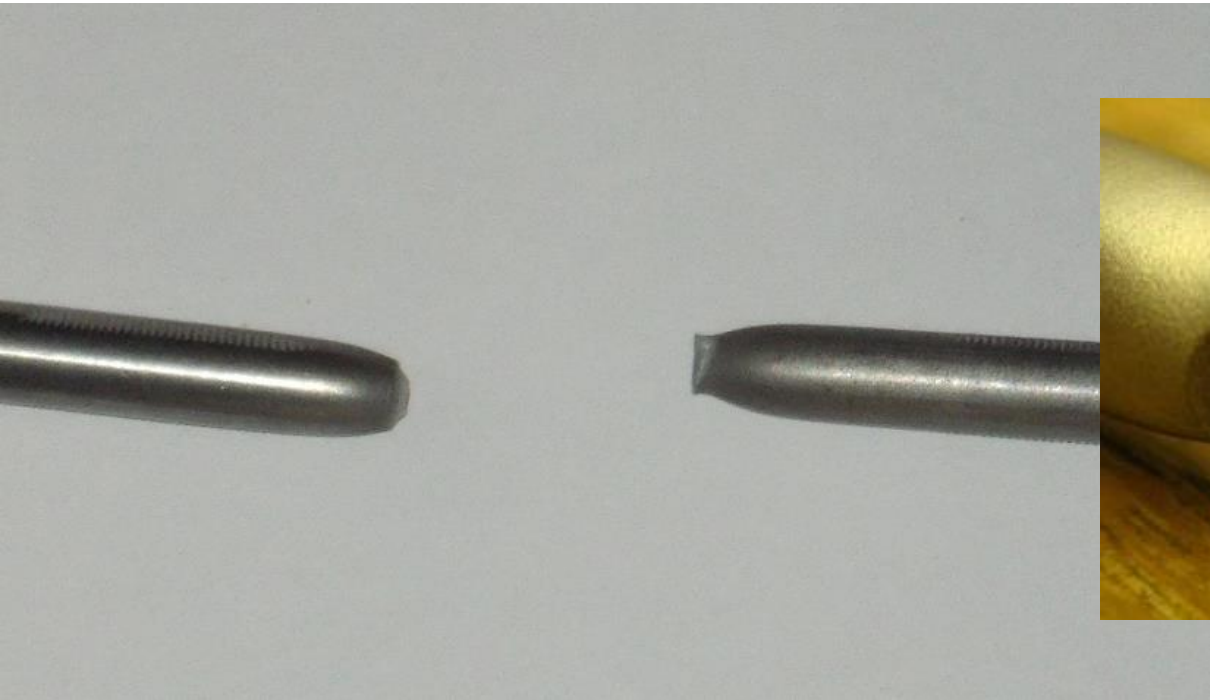
Gatunek stali	Grupa jakości	Praca łamania Charpy CVN		Temperatura obliczeniowa							Temperatura obliczeniowa			
		w T [°C]	J <sub>min</sub>	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20
				$\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$							$\sigma_{Ed} = 0,50$			
S235	JR	20	27	60	50	40	35	30	25	20	90	75	65	55
	J0	0	27	90	75	60	50	40	35	30	125	105	90	75
	J2	-20	27	125	105	90	75	60	50	40	170	145	125	105
S275	JR	20	27	55	45	35	30	25	20	15	80	70	55	50
	J0	0	27	75	65	55	45	35	30	25	115	95	80	70
	J2	-20	27	110	95	75	65	55	45	35	155	130	115	95
	M,N	-20	40	135	110	95	75	65	55	45	180	155	130	115
	ML,NL	-50	27	185	160	135	110	95	75	65	200	200	180	155
S355	JR	20	27	40	35	25	20	15	15	10	65	55	45	40
	J0	0	27	60	50	40	35	25	20	15	95	80	65	55
	J2	-20	27	90	75	60	50	40	35	25	135	110	95	80
	K2,M,N	-20	40	110	90	75	60	50	40	35	155	135	110	95
	ML,NL	-50	27	155	130	110	90	75	60	50	200	180	155	135
S420	M,N	-20	40	95	80	65	55	45	35	30	140	120	100	85
	MI NI	-50	27	135	115	95	80	65	55	45	190	165	140	120

EN 1993-1-10 tab. 2.1

# Przełom plastyczny

Specyficzna nazwa dla przekroczenia nośności

$$E / R > 1,0$$



Rys: Autor



Rys: wikipedia

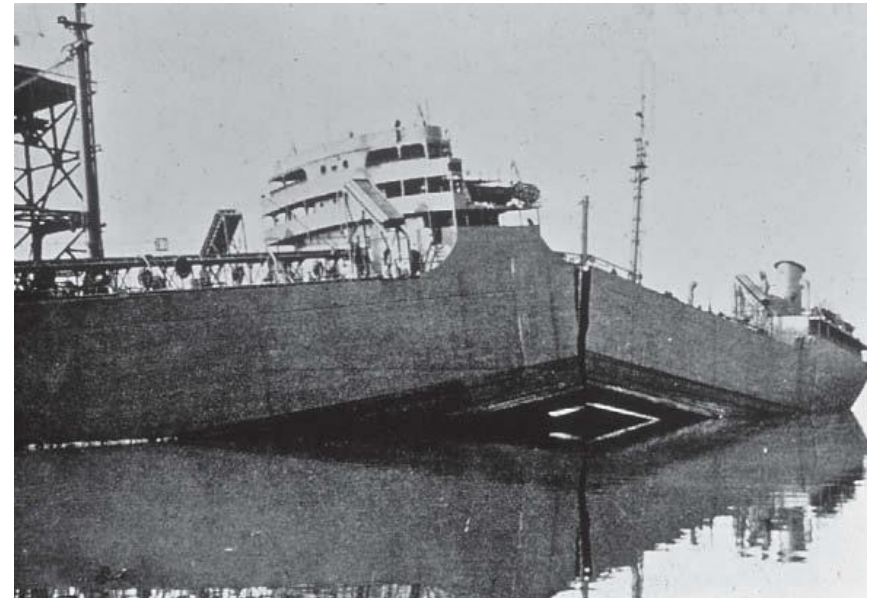
## Przykłady



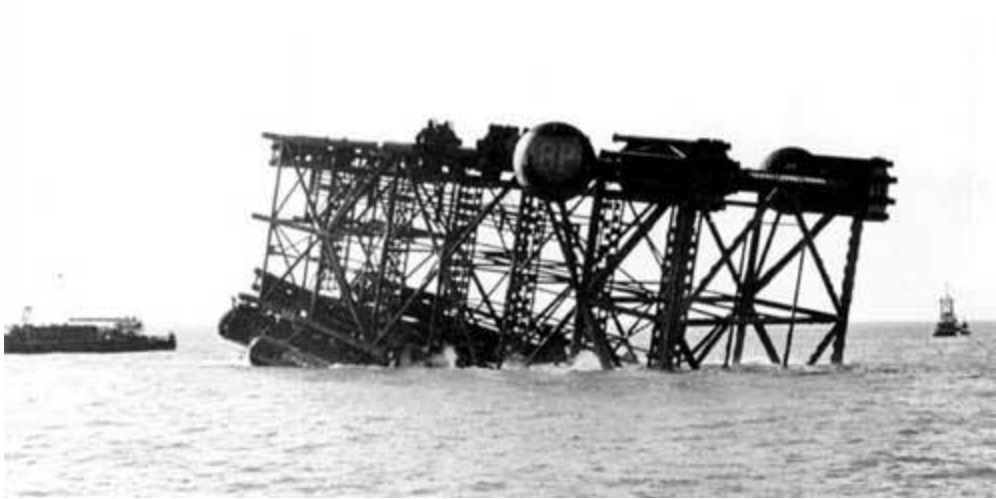
Rys: wikipedia

Atlanty, MS Titanic, 1912 – kruche pękanie

Atlanty, wiele statków typu „Liberty”, II  
Wojna Światowa – pękanie wodorowe



Rys: tmetallurgyandmaterials.wordpress.com



Rys: twi-global.com

Morze Północne, platforma wiertnicza BP, 2001 – pęknięcie lamelarne

USA, Memphis, most Hernando De Soto przez Mississippi, 2021 – pęknięcie wodorowe



Rys: washingtonpost.com

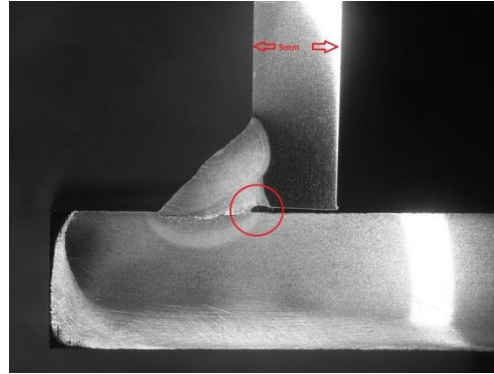
## Wnioski

W wielu przypadkach nie jesteśmy w stanie uniknąć pęknięcia przed / w czasie / po spawaniu. Z tego powodu bardzo ważna jest analiza imperfekcji spoin (wśród nich – pęknięć). Służą temu testy nieniszczące (NDT = non-destructive test). Ich zakres jest określony przez klasę wykonania konstrukcji.

# Imperfekcje



Rys: weldreality.com



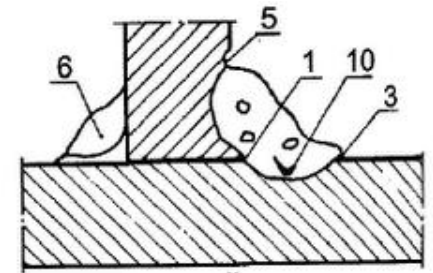
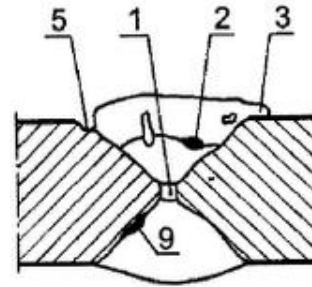
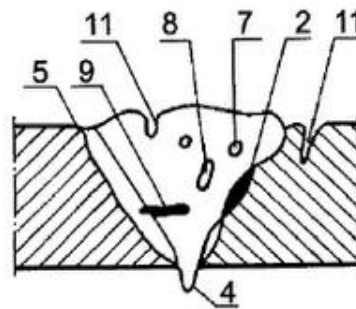
Rys: weldingtipsandtricks.com



Rys: weldreality.com



Rys: bbs.homeshopmachinist.net



Rys: Łubiński M, Filipowicz A, Żółtowski W, "Konstrukcje metalowe", Arkady 2000

Od czego zależą 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

EN 1090-2 tab B.3

Jeśli nie mamy dokładnych danych, przyjmujemy EXC2.

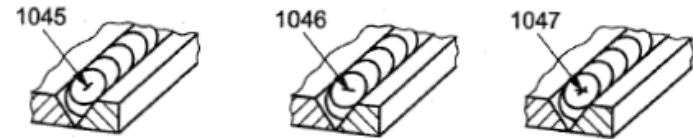
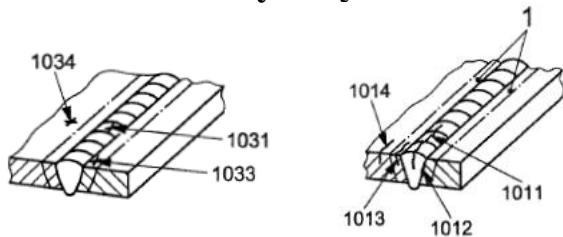
Klasy wykonania są ważne dla badania spoin (EN 1090-2 7.6)

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

# EN ISO 6520-1 Spawanie i procesy pokrewne; klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach

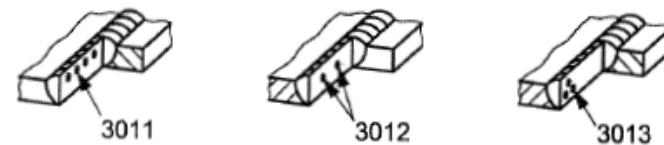
## Tablica 1

### Pęknięcia

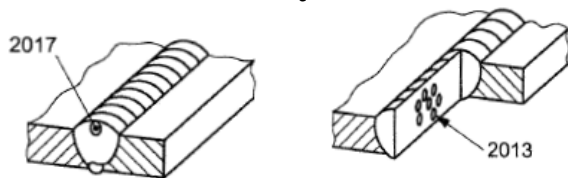


### Kratery

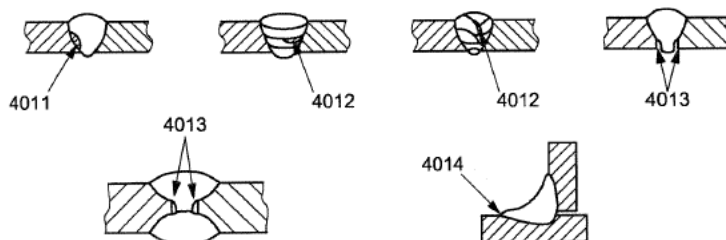
### Wtrącenia (okruchy ciał stałych)



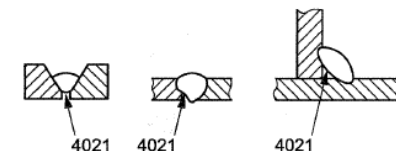
### Pory gazu



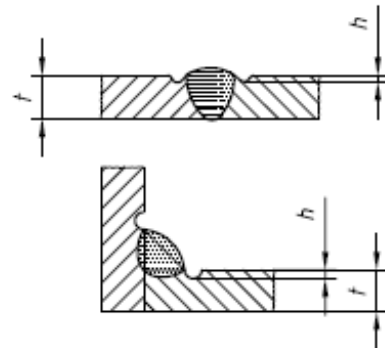
### Przyklejenie



### Niepełny przetop



No.	ISO 6520-1 reference	Imperfection designation	Remarks	<i>t</i> mm	Limits for imperfections for quality levels		
					D	C	B
1.7	5011 5012	Continuous undercut Intermittent undercut	Smooth transition is required. This is not regarded as a systematic imperfection.	0,5 to 3	Short imperfections: $h \leq 0,2 t$	Short imperfections: $h \leq 0,1 t$	Not permitted
				> 3	$h \leq 0,2 t$ , but max. 1 mm	$h \leq 0,1 t$ , but max. 0,5 mm	$h \leq 0,05 t$ , but max. 0,5 mm



EN ISO 5817 tab. 1 - limits of imperfections for quality level

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 <math>U</math> = Stopień wykorzystania nośności spoiny przy oddziaływaniach przeważająco statycznych. <math>U = E_d/R_d</math>, gdzie <math>E_d</math> – największy efekt oddziaływania <math>R_d</math> – nośność spoiny.</p> <p>UWAGA 3 Oznaczenia <math>a</math> i <math>t</math> 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. → #6 / 56

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

Najczęściej stosowane nieniszczące metody badań spoin (NDT) to:

- ogląd spoiny (VT);
- proszek magnetyczny (MT);
- badanie penetracyjne (PT);
- badania ultrasonograficzne (UT);
- prześwietlenie rentgenem (RT);

## Pogoda

Jakość pracy jest dużo istotniejsza dla połączeń spawanych, niż śrubowych.



Rys: pytamy.wp.pl



Rys: polskiekrajobrazy.pl

Rys: kobieta.onet.pl

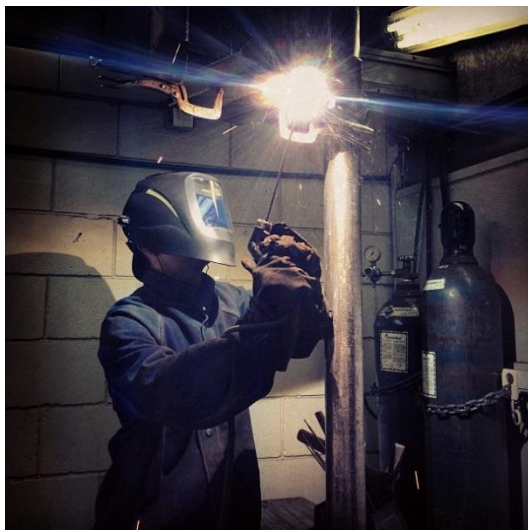


Rys: blog-medyczny.pl

Zła pogoda wpływa w istotny sposób na jakość pracy ludzi, zatem i na jakość połączeń. Połączenia śrubowe są dużo mniej wrażliwe na niedokładności w pracy.

→ #8 / 61

Złe warunki pogodowe lub niewygodna pozycja spawacza znacznie obniżają jego koncentrację podczas pracy. Zwiększa to prawdopodobieństwo źle wykonanych spoin i liczbę imperfekcji.



Rys: jamietilson.ca



Rys: blog-medyczny.pl



Rys: cnc.info.pl

Eurokod zakłada doskonałą kontrolę techniczną imperfekcji spawalniczych. Nie dopuszcza możliwości wystąpienia słabych spoin. Nie wprowadza żadnych dodatkowych parametrów do wzorów EN 1993-1-8 (4.1) na wytrzymałość spoiny, biorąc pod uwagę wpływ położenia lub pogody. Tego typu współczynniki zostały określone przez starą Polską Normę.

PN-B 3200, tab. 18

Warunki	$\alpha_R$
Spoiny na budowie	0,9
Spoiny nad głową	0,8
Spoiny na budowie nad głową	0,7

Nieoficjalnie, można to uwzględniać także w Eurokodzie.

$$\sqrt{[(\sigma_{\perp})^2 + 3(\tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2)]} \leq \alpha_R [f_u / (\beta_w \gamma_{M2})]$$

oraz

$$\sigma_{\perp} \leq \alpha_R [0,9 f_u / \gamma_{M2}]$$

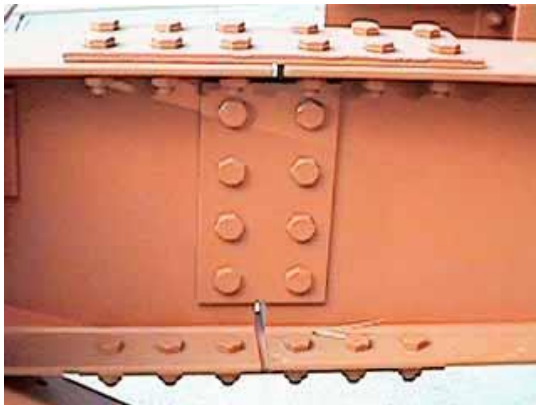
Preferowanie połączeń śrubowych do łączenia elementów na placu budowy jest sposobem na uniknięcie problemów związanych z wpływem warunków atmosferycznych na jakość spoin.



Rys: tboake.com



Rys: tboake.com



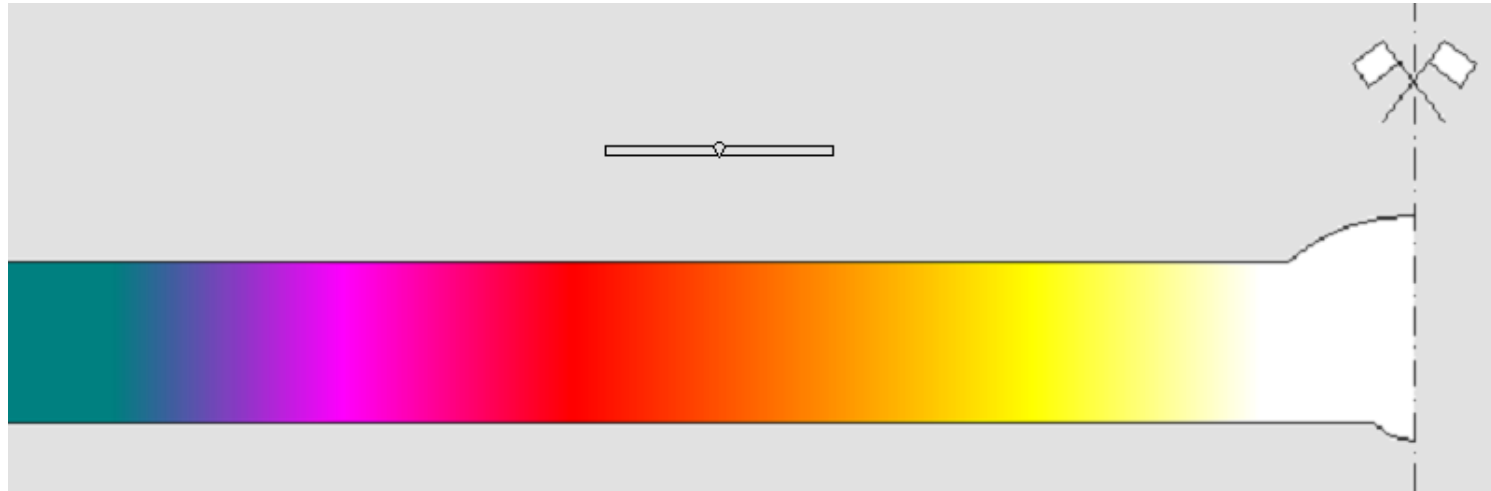
Rys: amsd.co.uk



Rys: moellerengineering.com

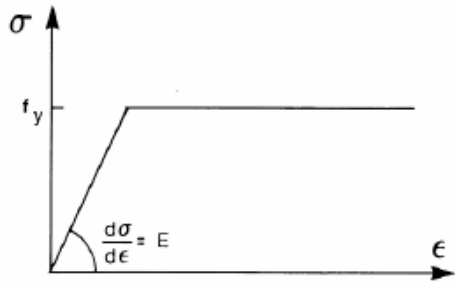
# Napężenia i odkształcenia resztkowe

Rys: Autor



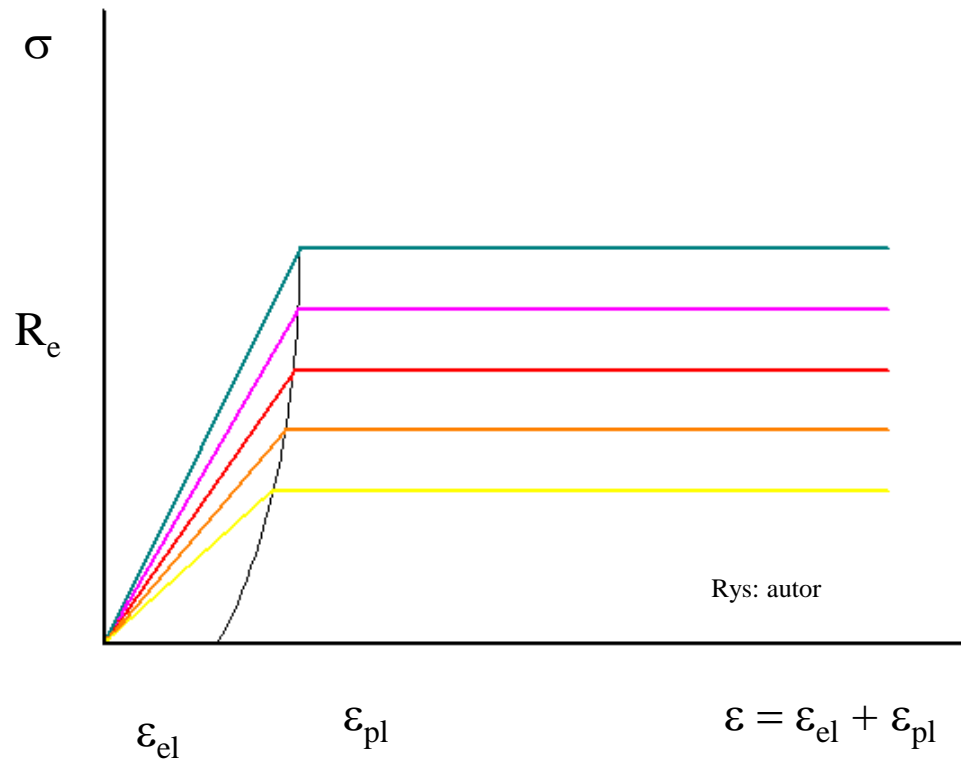
Stal w stanie stałym			Ciekła stal
Bez zmiany wartości $E, f_y, f_u$	Spadek wartości $E, f_y, f_u$	Wartości $E, f_y, f_u \approx 0$	Ciecz - brak $E, f_y, f_u$
„Normalna” zależność $\sigma - \varepsilon$	Zmiana zależności $\sigma - \varepsilon$	Brak zależności $\sigma - \varepsilon$	
Różna temperatura, różna wielkość kryształów stali – różne wartości naprężeń i odkształceń			
„Pełna” wartość naprężeń przy odkształceniach	„Zredukowana” wartość naprężeń przy odkształceniach	Brak naprężeń przy deformacjach	

## „Normalna” zależność $\sigma - \epsilon$



Rysunek 5.8: Dwuliniowa zależność naprężenie - odkształcenie

Rys: EN 1993-1-1 rys. 5.8



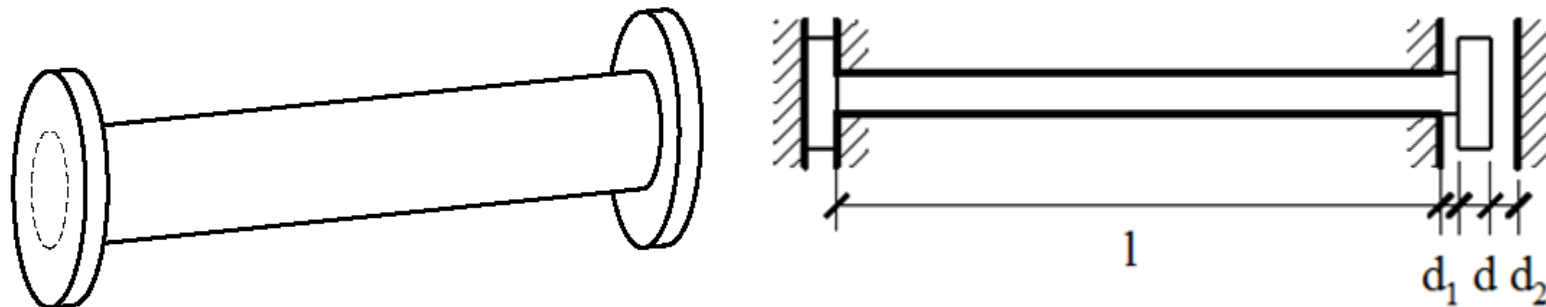
Rys: autor

Zmiana zależności  $\sigma - \epsilon$  przy wzroście temperatury:

- spadek wartości  $R_e$  (półka plastyczna coraz niżej)
- spadek wartości  $E$  (spadek nachylenia prostej w części sprężystej)
- zmniejszenie zakresu strefy sprężystej

Wzrost temperatury

Model do analizy naprężeń i odkształceń resztkowych – pręt okrągły z dwiema tarczami na końcach.



Rys: Autor

Szczelina  $d_2$  - model podatności części ciekłej materiału podczas nagrzewania.

Szczelina  $d_1$  - model podatności części ciekłej materiału podczas stygnięcia.

Parametry zależą od temperatury:

$$\varepsilon = \alpha_T \Delta T$$

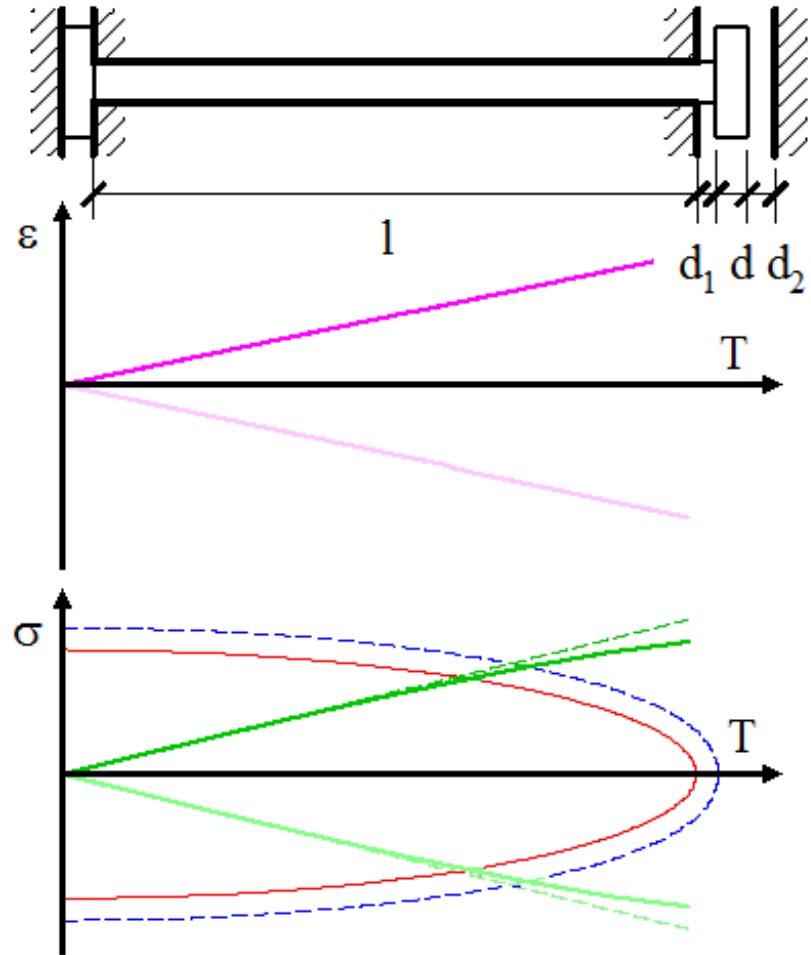
$$\sigma = \varepsilon E$$

$$\alpha_T \neq \alpha_T (\Delta T)$$

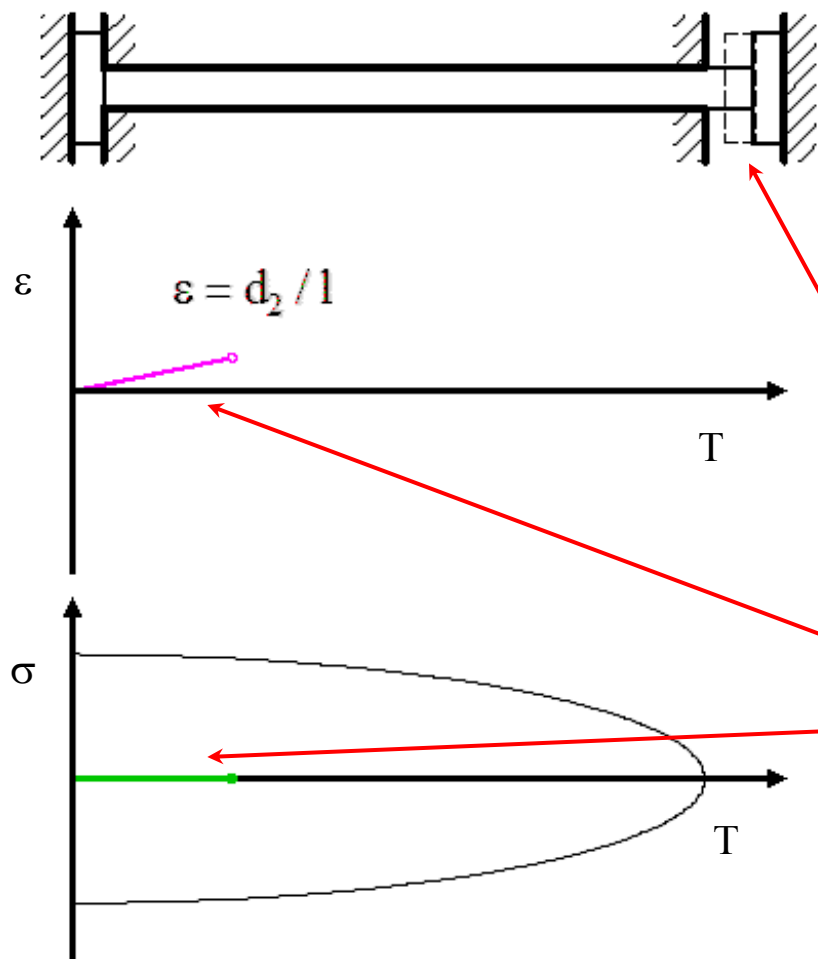
$$E = E (\Delta T) \rightarrow \sigma = \sigma (\Delta T)$$

$$R_e = R_e (\Delta T)$$

Rys: Autor



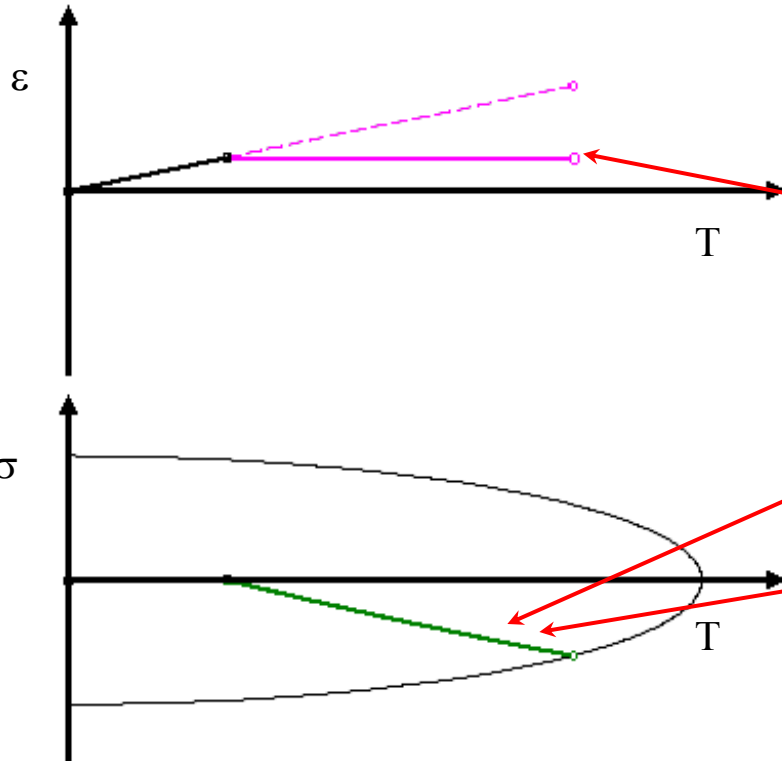
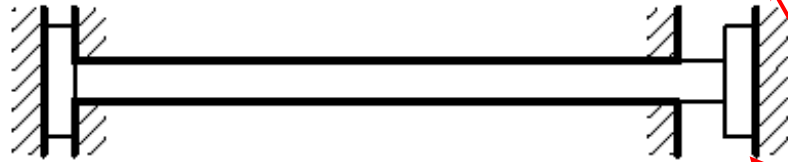
Rys: Autor



Temperatura rośnie:

Dla  $\Delta \leq d_2 \rightarrow$  odkształcenie swobodne, brak naprężeń

Rys: Autor



Temperatura rośnie;

Plastyczny zakres  $\sigma - \epsilon$ ;

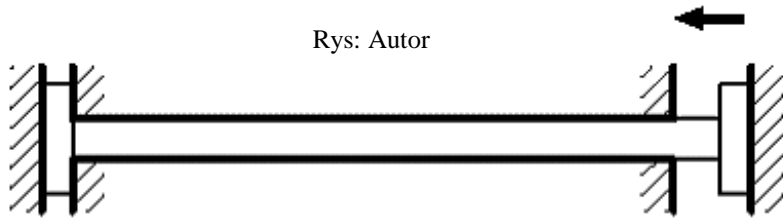
Reakcja rośnie;

Brak możliwości deformacji;

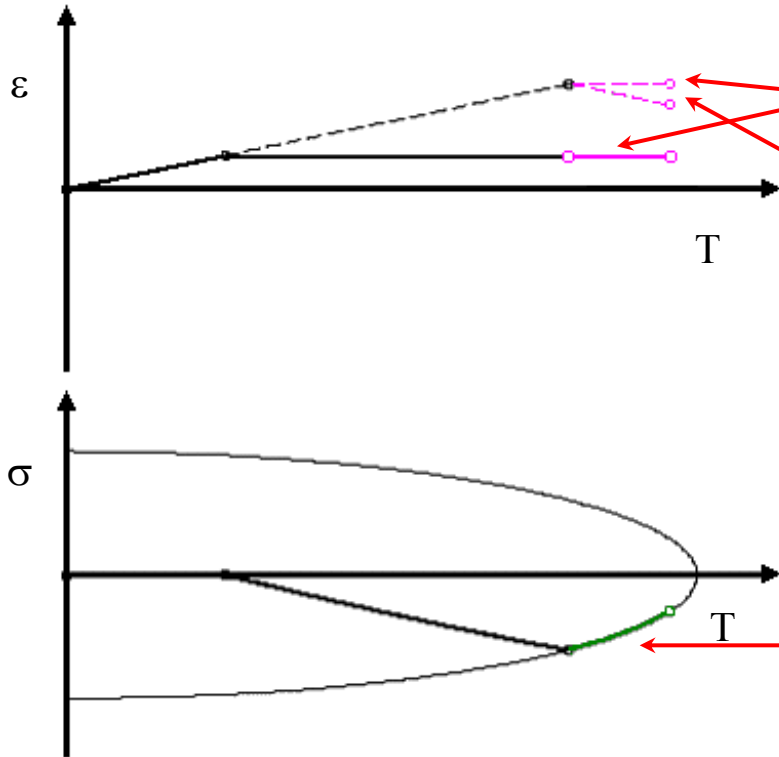
Wzrost naprężeń;

Nieliniowa zależność naprężenie-temperatura (zmiana charakterystyk mechanicznych stali ze względu na temperaturę,  $E$  maleje)

Rys: Autor



Temperatura rośnie:



Brak możliwości deformacji:

dla „zwykłej” zależności (podpora, stała temperatura) – linia pozioma przerywana;

dla wzrastającej temperatury, podpora – linia przerywana ukośna;

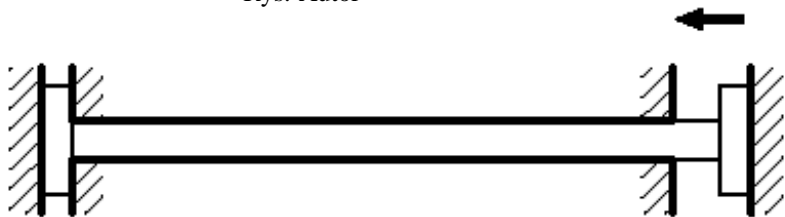
Reakcja rośnie;

Plastyczna zależność  $\sigma - \varepsilon$ :

półka plastyczna,  $\sigma = f_y$ ;

$f_y$  spada wraz ze wzrostem temperatury;

Rys: Autor



Temperatura spada:

Zakres sprężysty  $\sigma - \varepsilon$ ;

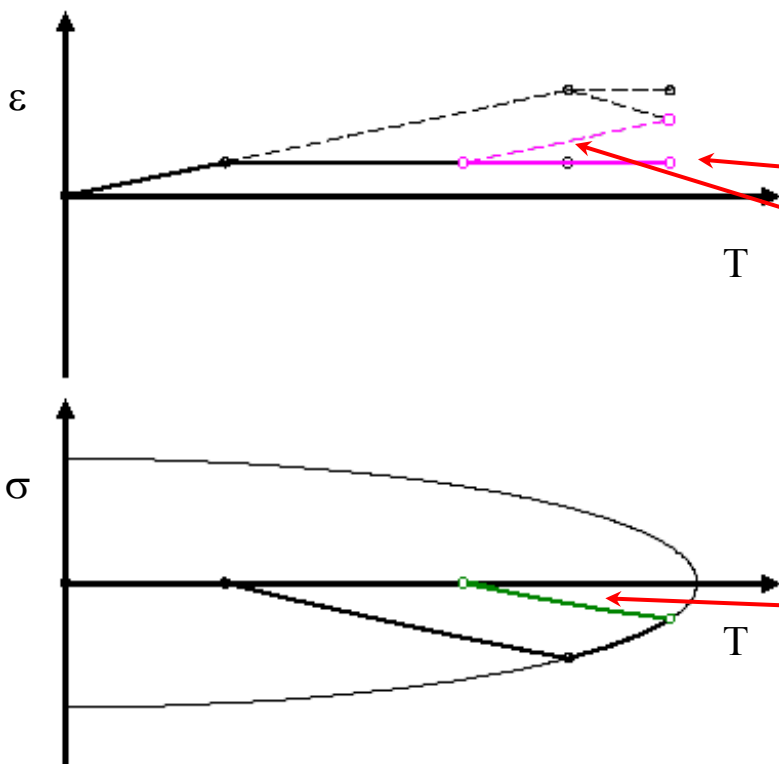
Reakcja spada;

Brak możliwości deformacji:

dla „zwykłej” zależności (bez podpory, stała temperatura) – linia ukośna przerywana;

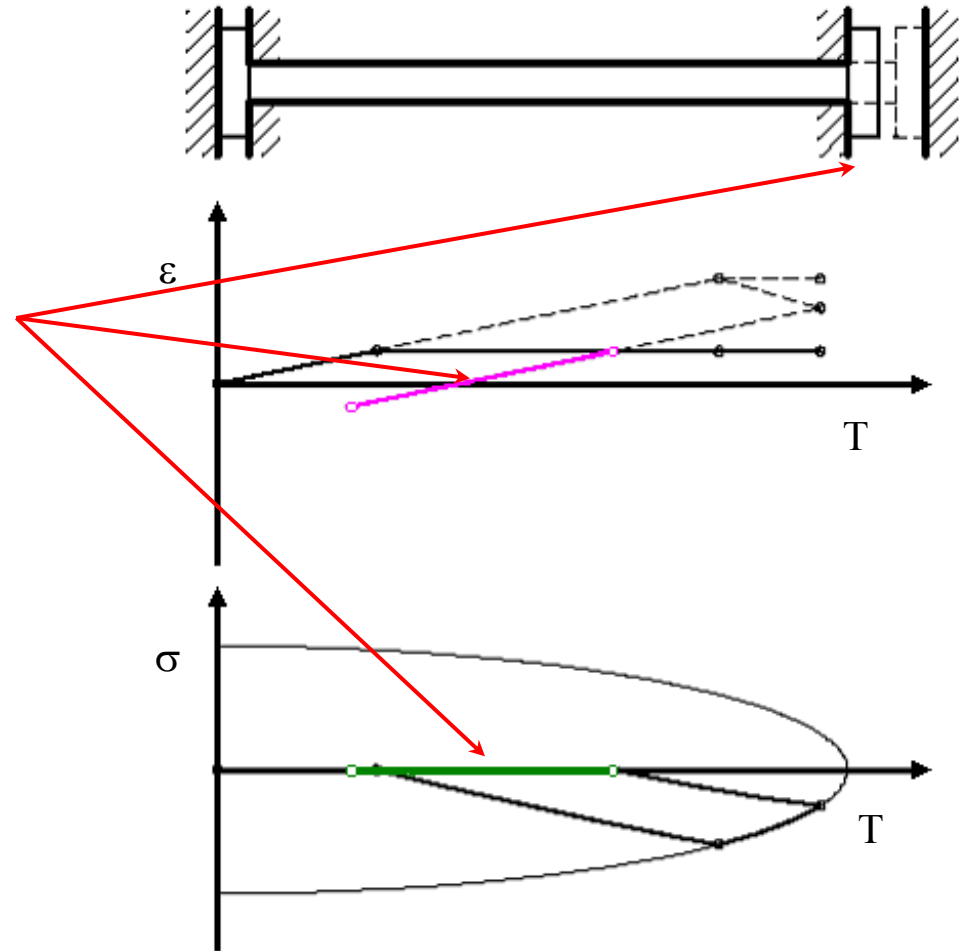
Naprężenia spadają;

Nieliniowa zależność naprężenie-temperatura (zmiana charakterystyk mechanicznych stali ze względu na temperaturę,  $E$  rośnie)



Temperatura spada:

Odształcenia swobodne, brak naprężeń;



Temperatura spada:

Rys: Autor

Sprężysty zakres  $\sigma - \varepsilon$ ;

Reakcja na lewej podporze rośnie;

Brak możliwości deformacji;

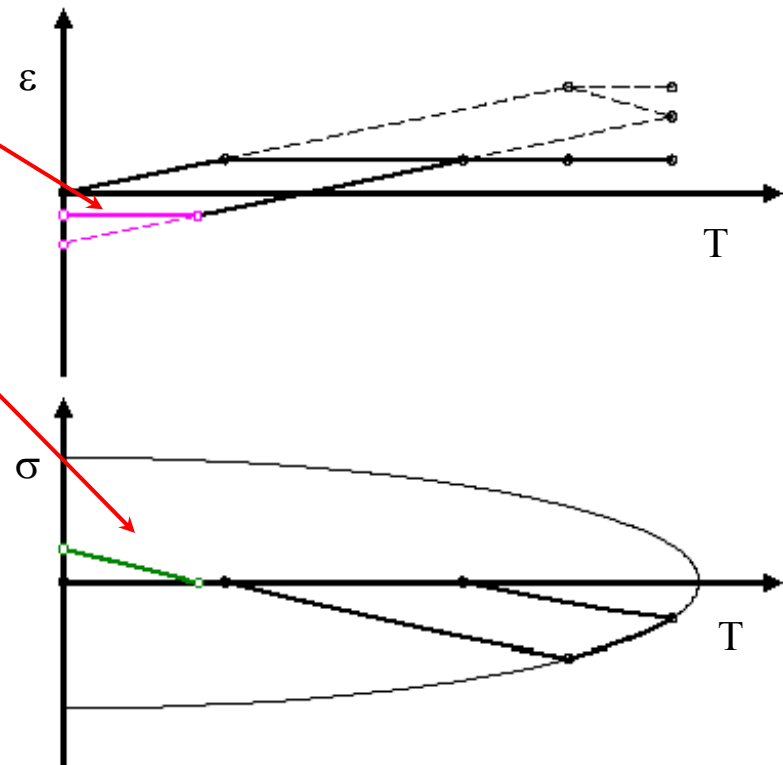
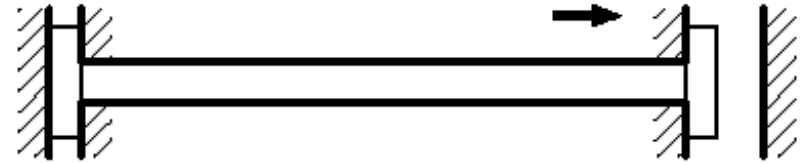
Wzrost naprężeń;

Nieliniowa zależność naprężenie-temperatura (zmiana charakterystyk mechanicznych stali ze względu na temperaturę,  $E$  rośnie)

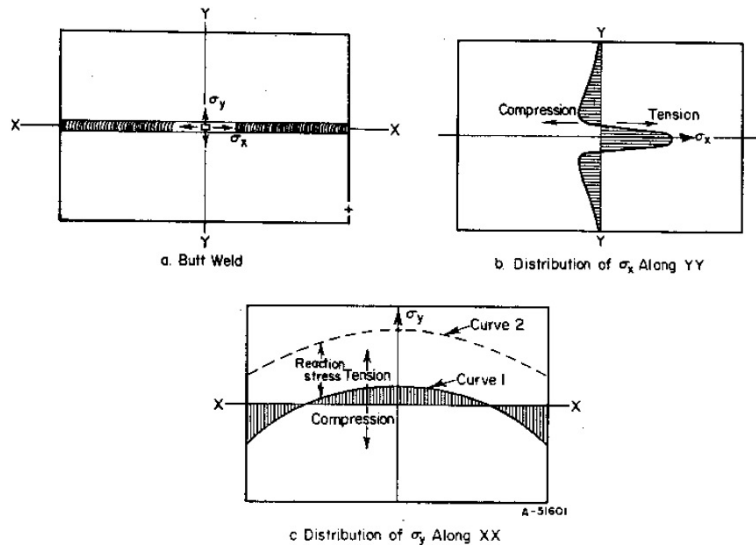
**Temperatura taka sama, co na początku;**

**Niezerowa wartość  $\varepsilon$ ;**

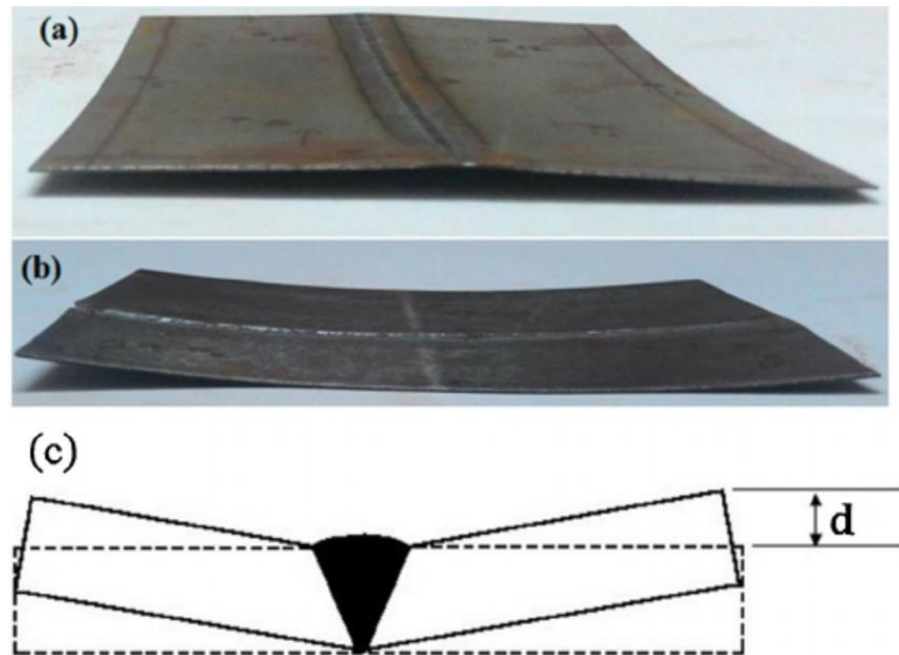
**Niezerowa wartość  $\sigma$ .**



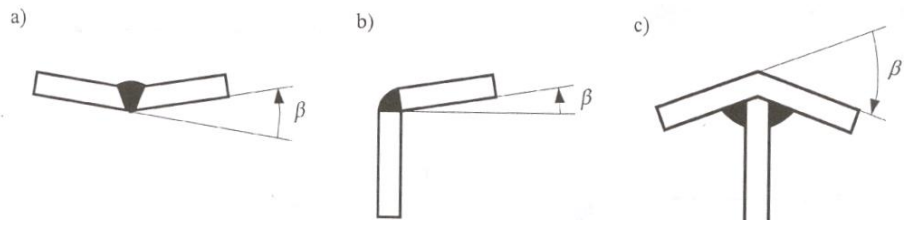
Obliczanie naprężeń i odkształceń resztkowych jest skomplikowane. Ich wartości zależą od geometrii spoin i łączonych elementów, rodzaju procesu spawalniczego i jego parametrów (napięcia i natężenia prądu, szybkości kładzenia spoiny), prędkości zmian temperatury, rozmiarów strefy oddziaływania ciepła, gatunku i podgatunku stali.



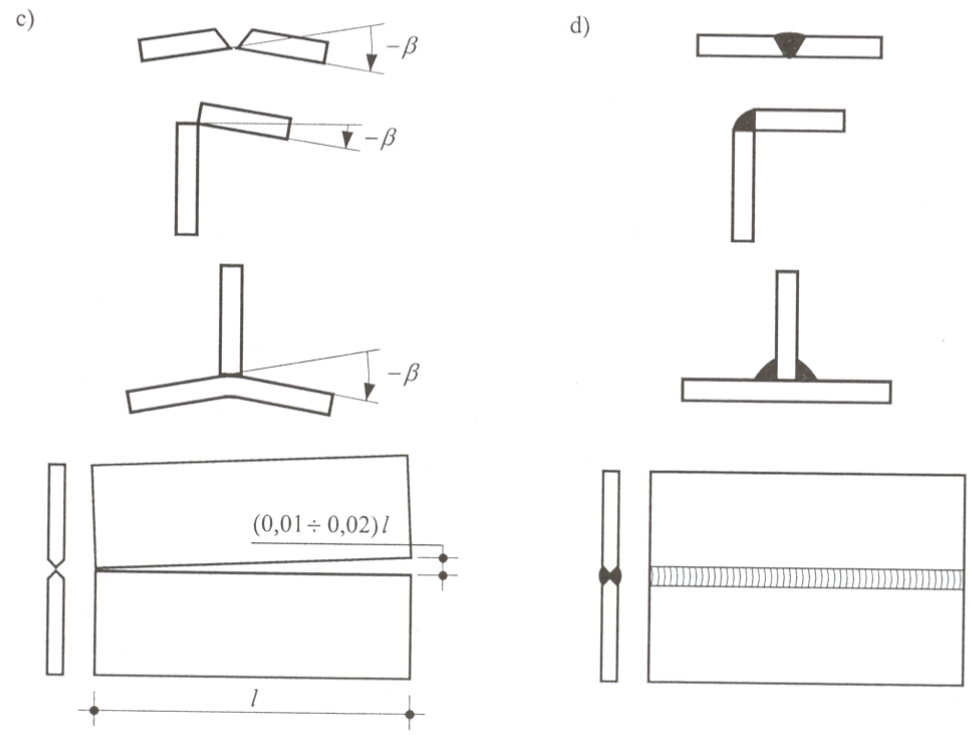
Rys: intechopen.com



Rys: Influence of heat input in microwelding of titanium alloy by micro plasma arc, M. Baruah, S. Bag



Staramy się zmniejszać wartość naprężeń resztkowych przez wygrzewanie relaksacyjne; oraz wartości odkształceń przez zastosowanie „przeciwoodkształceń” w elementach spawanych.



Rys: M. Łubiński, W. Żółtowski, Konstrukcje Metalowe t. II, Arkady, Warszawa 2004

## Zagadnienia egzaminacyjne

Rodzaje spoin

Podobieństwa i różnice między spoinami pachwinowymi i czołowymi

Rodzaje pękania

Wpływ obciążeń dynamicznych i cyklicznych na obliczenia i wykonawstwo spoin

Dziękuję za uwagę

© 2025 dr inż. Tomasz Michałowski

[tmichal@usk.pk.edu.pl](mailto:tmichal@usk.pk.edu.pl)