

Konstrukcje metalowe

Wykład II

Właściwości fizyczne, chemiczne i mechaniczne metali

Spis treści

Najważniejsze właściwości → #t / 3

Badania wytrzymałościowe → #t / 8

Analiza wyników → #t / 31

Inne parametry mechaniczne → #t / 58

Skład chemiczny → #t / 85

Oznaczenia stali → #t / 90

Stopy aluminium → #t / 91

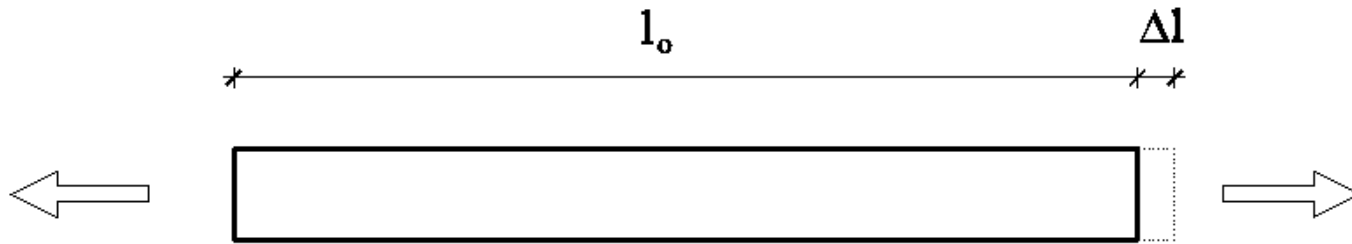
Zmiany struktury wewnętrznej → #t / 95

Zagadnienia egzaminacyjne → #t / 98

Najważniejsze właściwości

	Stal	Aluminium
Ciężar własny [kN/m ³], d	78,5	27,0
Temperatura topienia [°C], T _m	1 538	660
Temperatura wrzenia [°C], T _b	2 861	2 060
Moduł Younga [GPa], E	210	70
Moduł Kirchhoffa [GPa], G	81	27
Współczynnik Poissona, ν	0,30	0,33
Wydłużalność cieplna [10 ⁻⁶ / °C], α _T	11,8	23,0

Moduł Younga i Kirchhoffa



Rys: Autor

$\varepsilon E = \sigma$ (Prawo Hooke'a, prawdziwe dla odkształceń sprężystych)

$$\varepsilon = \Delta l / l_0$$

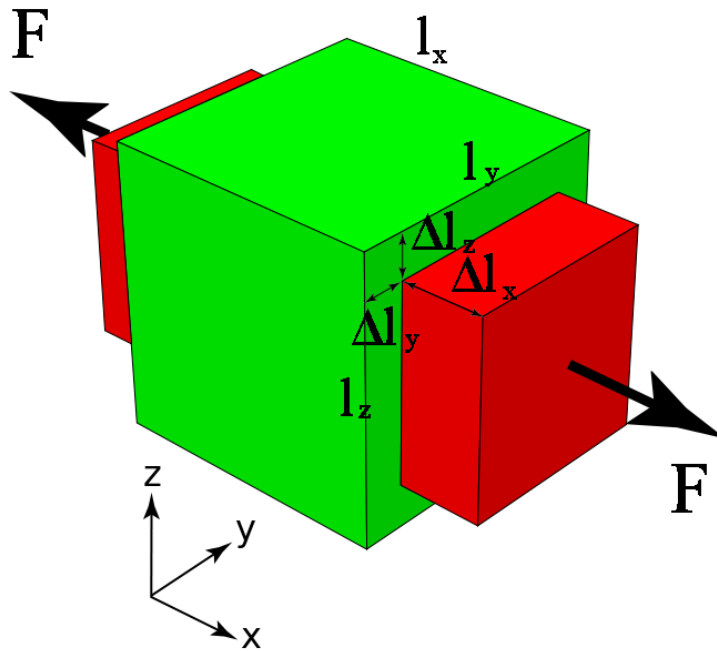
$$\Delta l E / l_0 = \sigma$$

$$\Delta l = l_0 \rightarrow \Delta l + l_0 = 2 l_0 \rightarrow \varepsilon = \Delta l / l_0 = 1 \rightarrow E = \sigma$$

Moduł Younga = teoretyczne naprężenie w przypadku dwukrotnego wydłużenia

$$G = E / (2 + 2 \nu)$$

Współczynnik Poissona



Rys: wikipedia

$$\varepsilon_x = \Delta l_x / l_x$$

$$\varepsilon_y = \Delta l_y / l_y$$

$$\varepsilon_z = \Delta l_z / l_z$$

$$\nu = \varepsilon_y / \varepsilon_x = \varepsilon_z / \varepsilon_x$$

Współczynnik wydłużalności
cieplnej

$$T_0 \rightarrow l_0$$

$$T_0 \pm \Delta T \rightarrow l_0 \pm \Delta l$$

$$\Delta l / l_0 = \Delta T \alpha_T$$

Przykład:

IPE 500 ($A = 116 \text{ cm}^2$); $l_0 = 20,0 \text{ m}$; $\Delta T = 20^\circ\text{C}$

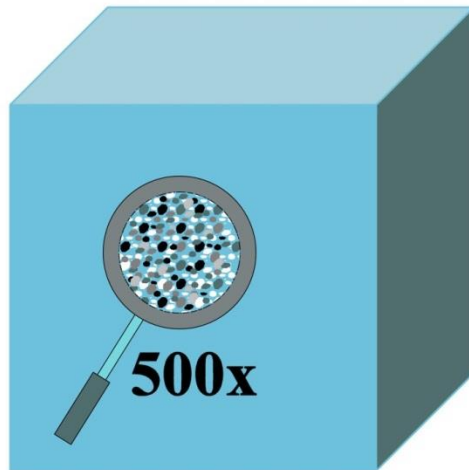
$$\Delta l = l_0 \Delta T \alpha_T = 0,4 \text{ mm}$$

Siła osiowa, równoważna temu wydłużeniu:

$$N_{Ed} / (E A) = \Delta l / l_0$$

$$N_{Ed} = E A \Delta l / l_0 = 48,720 \text{ kN} ; \sigma(N_{Ed}) = 4,200 \text{ MPa}$$

Jednorodne, izotropowe



Rys: Autor

Wytrzymałość

f (rozciąganie) = f (ściskanie)

f ta sama w każdym kierunku

Badania wytrzymałościowe

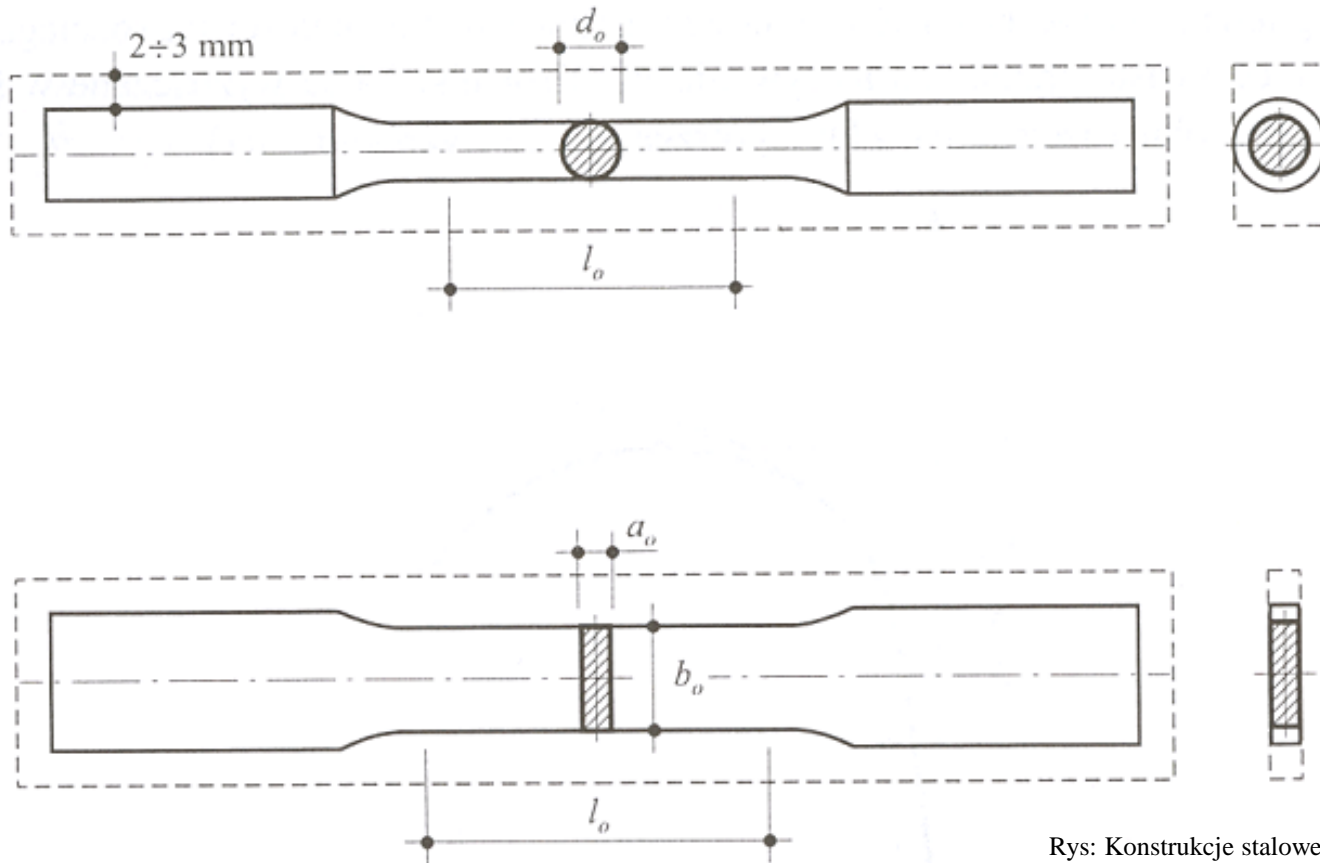


Rys: Autor

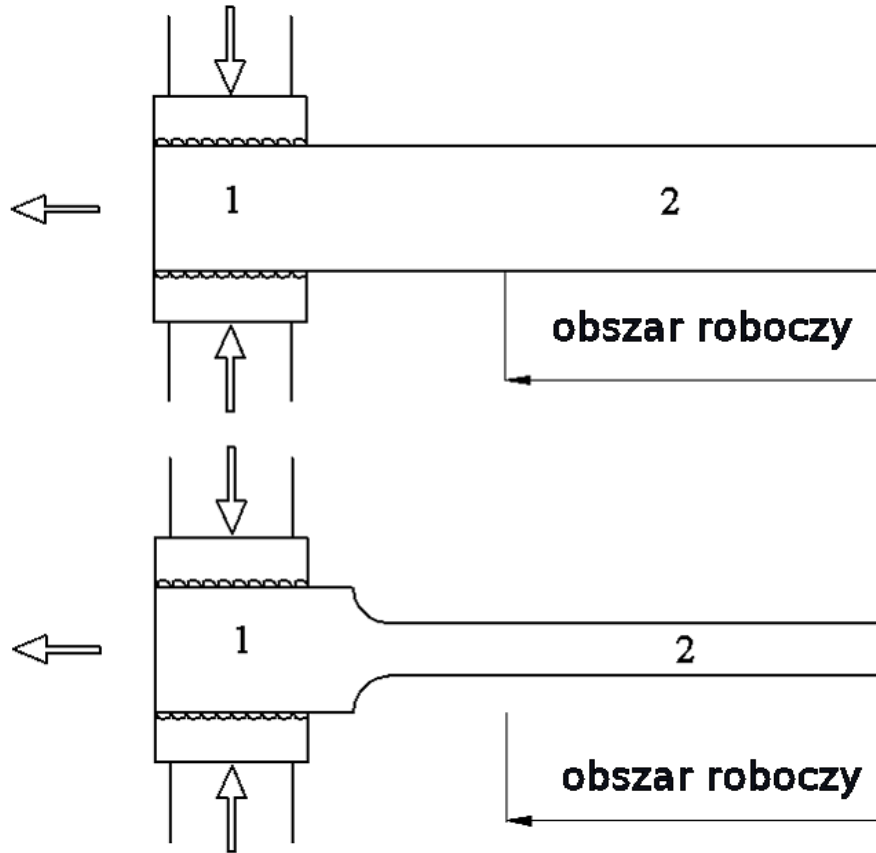


Rys: feiplar.com.br

Kształt próbki



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



Rys: Autor

$$A = \text{const}$$

$$\sigma_{\text{HMH}, 1} \geq \sigma_{\text{HMH}, 2}$$

Możliwość zniszczenia poza
obszarem roboczym

$$A \neq \text{const}$$

$$\sigma_{\text{HMH}, 1} \leq \sigma_{\text{HMH}, 2}$$

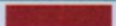


Zniszczenie w obszarze roboczym

Próbka jest wkładana w szczęki maszyny i rozciągana

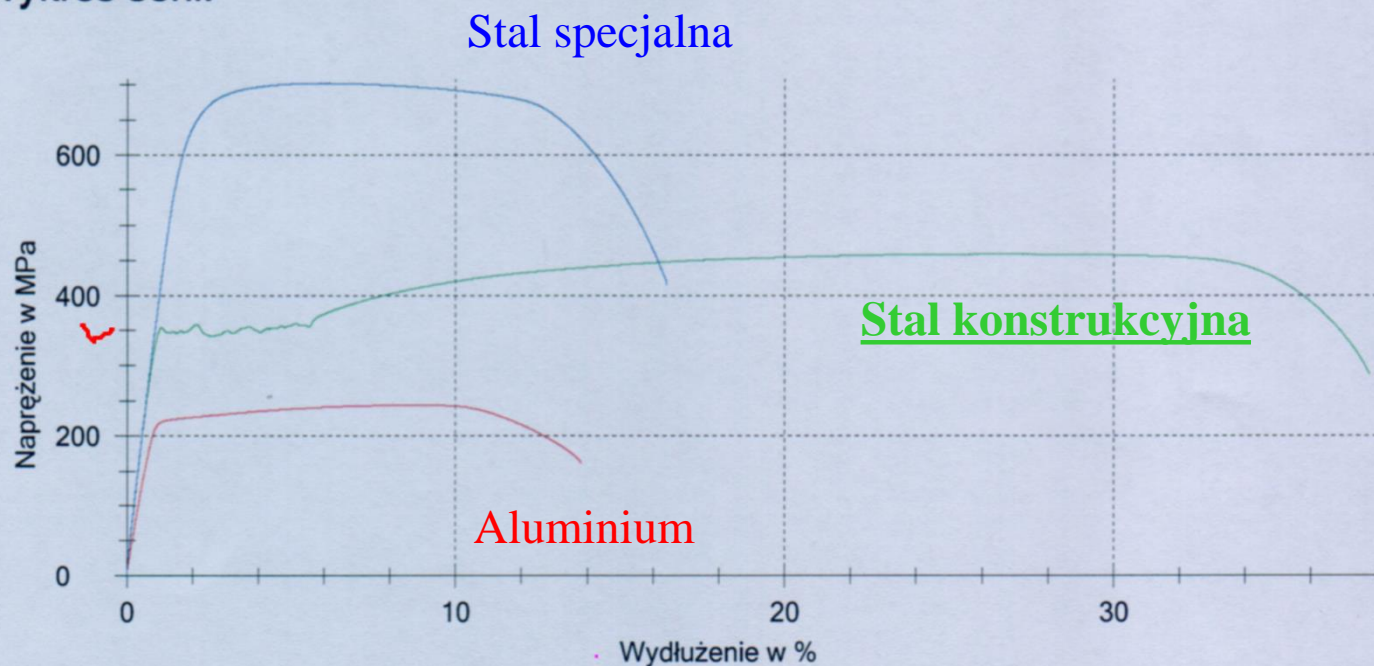


Rys: paragonssystems.ca

Wyniki badania:

Legenda	Nr	L ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	R _m MPa	R _B MPa	F _m kN	A _{gt} %	Z %
	6	100,40	78,54	-	-	-	244	161	19,14	8,68	-
	7	120,28	113,10	-	354	342	459	287	51,95	26,61	-
	8	120,19	113,10	-	-	-	702	415	79,43	6,15	-

Wykres serii:



Rys: Autor

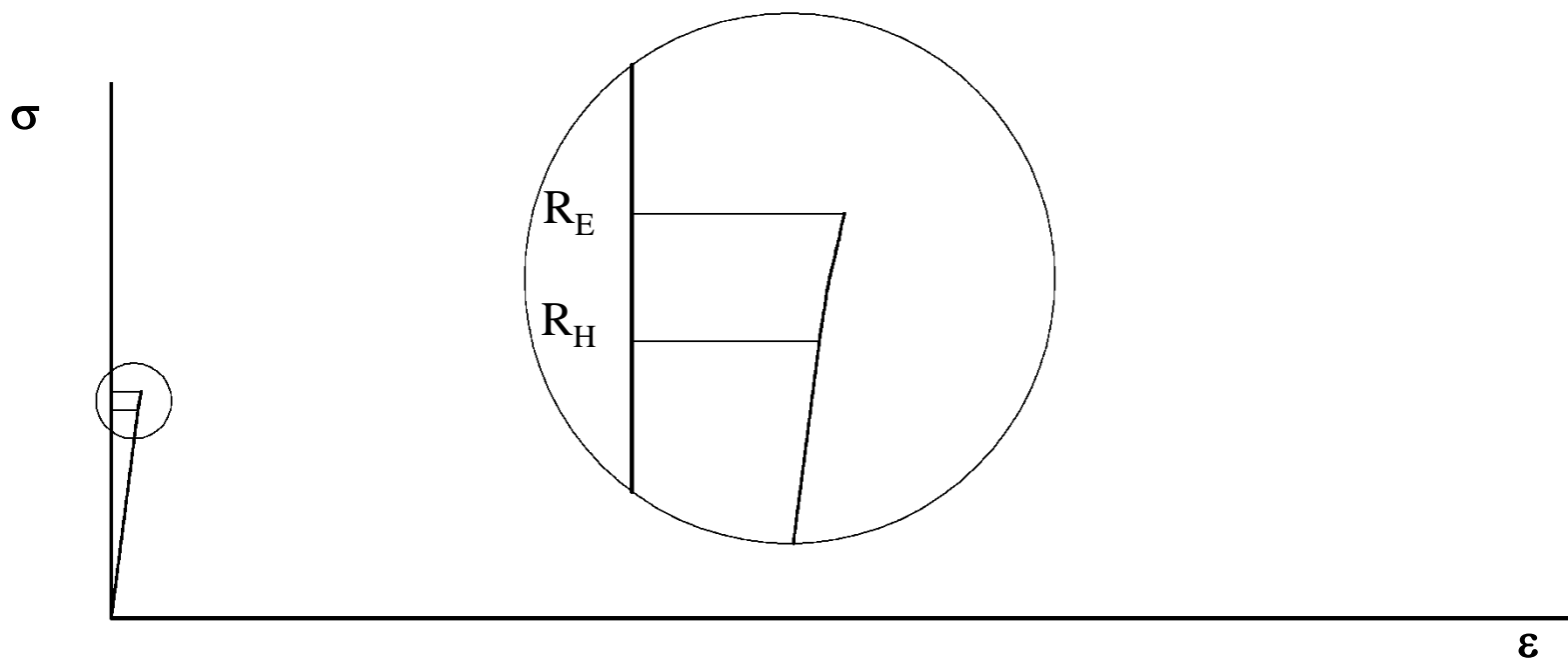
Stal konstrukcyjna

Liniowo-sprężysta część wykresu σ - ε . Tutaj $E = \text{const}$. Obowiązuje Prawo Hooke'a.



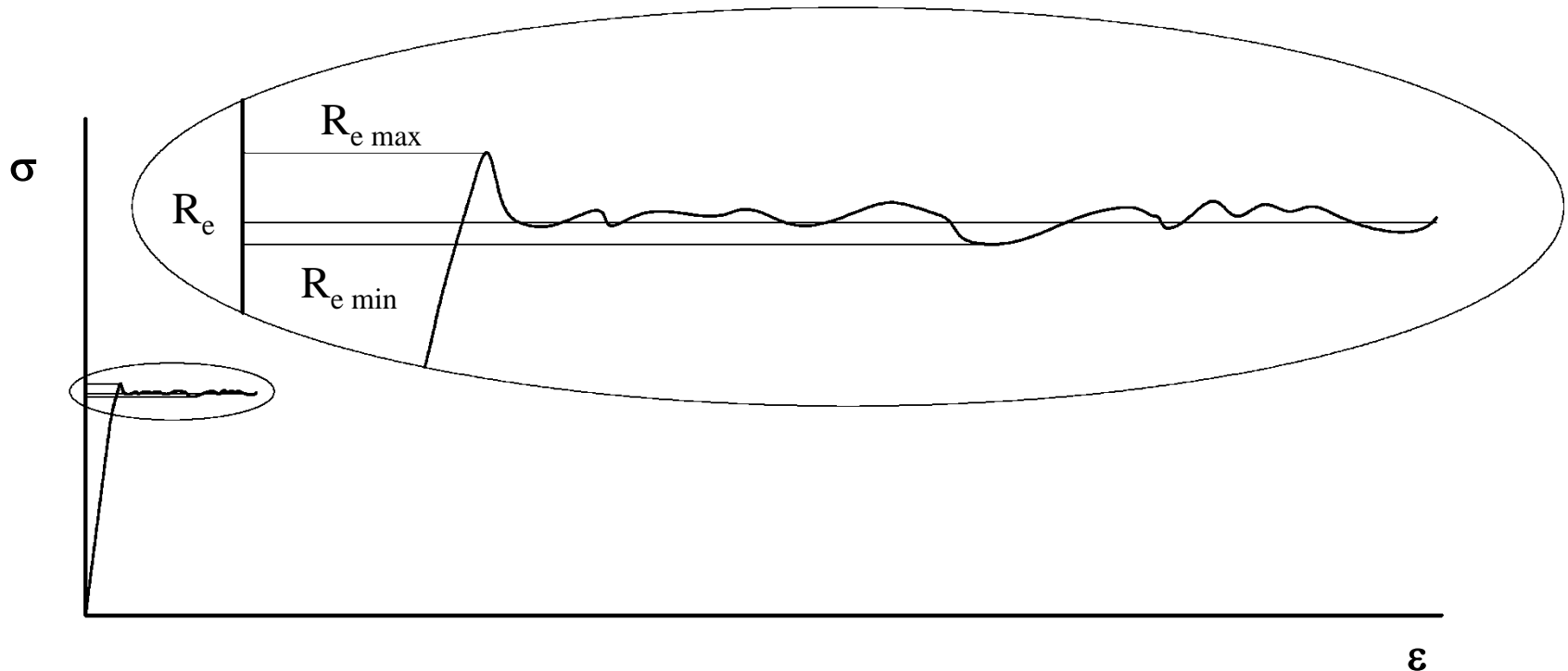
Rys: Autor

Część nieliniowo-sprężysta (pomiędzy R_H i R_E) wykresu σ – ε . tutaj $E \neq \text{const}$.
Prawo Hooke’a wciąż obowiązuje, ale pojawia się problem z pomiarem wartości E .
Brak jest wyraźnie uchwytnych zjawisk, związanych z przekroczeniem wartości R_H .
W gruncie rzeczy wszystko zależy od dokładności pomiaru. Przy niskiej
dokładności możemy nie wychwycić faktu, że moduł Younga zaczął zmieniać
wartość.



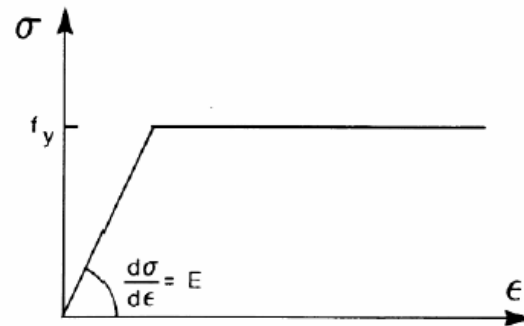
Rys: Autor

Plastyczna (nieliniowa) część wykresu σ – ϵ ; tak zwana półka plastyczna.
Deformacje narastają przy niemal stałej wartości naprężeń.



Rys: Autor

Idealizacja biliniowa:

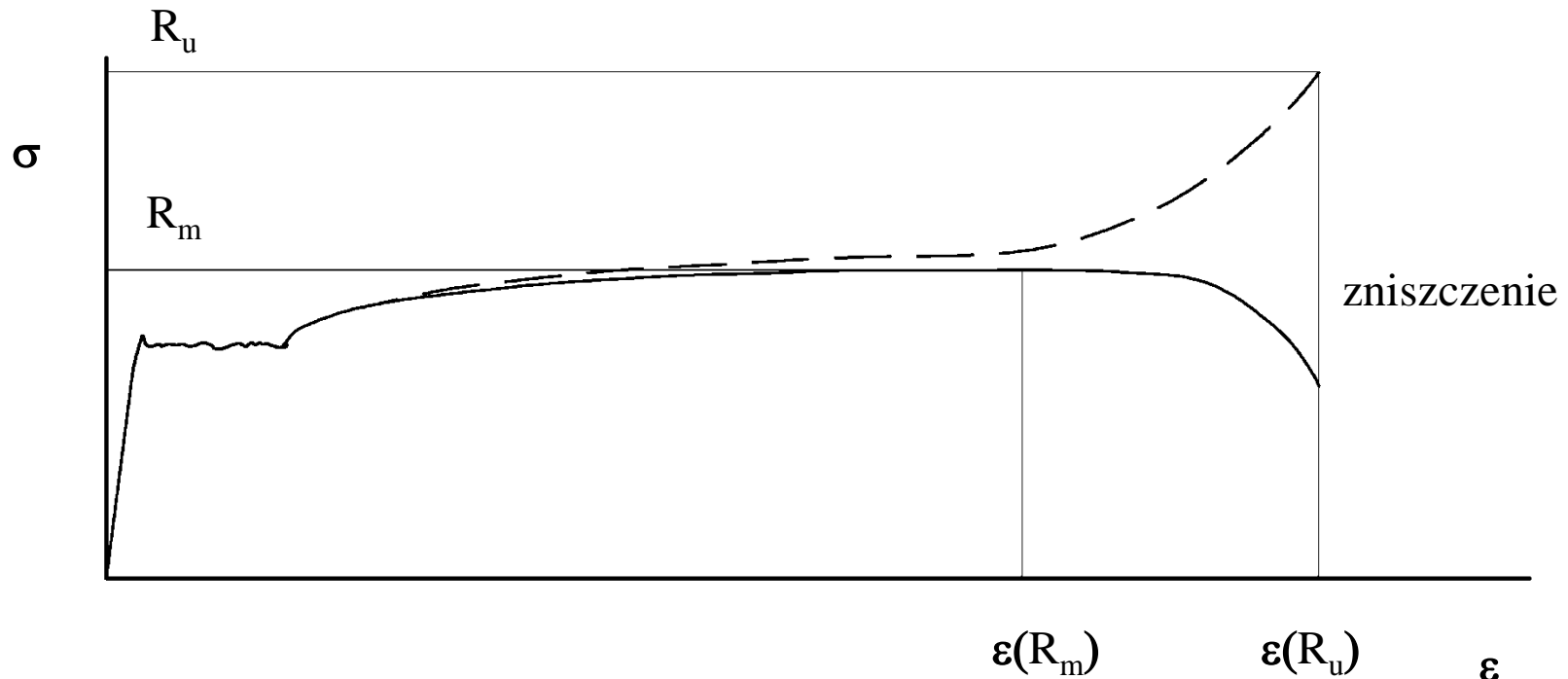


Rysunek 5.8: Dwuliniowa zależność naprężenie - odkształcenie

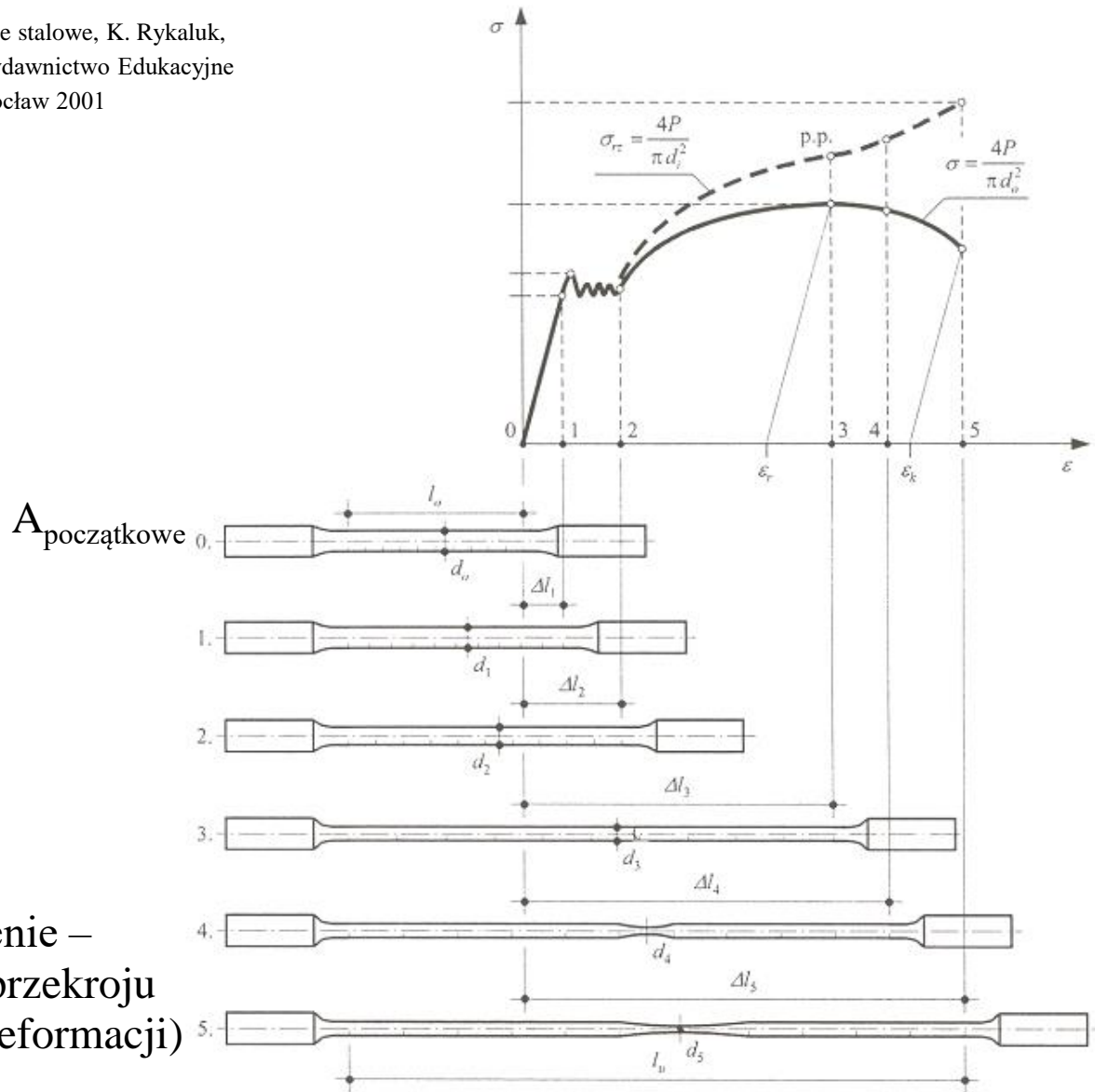
Rys: EN 1993-1-1 fig. 5.3

Plastyczna (nieliniowa) część wykresu σ – ε po półce plastycznej, tzw wzmocnienie. Możliwe są do nakreślenia dwie gałęzie wykresu:

- linia ciągła; $\sigma = F / A_{\text{początkowe}}$
- linia przerywana; $\sigma = F / A_{\text{aktualne}}$



Rys: Autor



$A_{\text{początkowe}}$

A_{aktualne}
 (przewężenie –
 redukcja przekroju
 podczas deformacji)

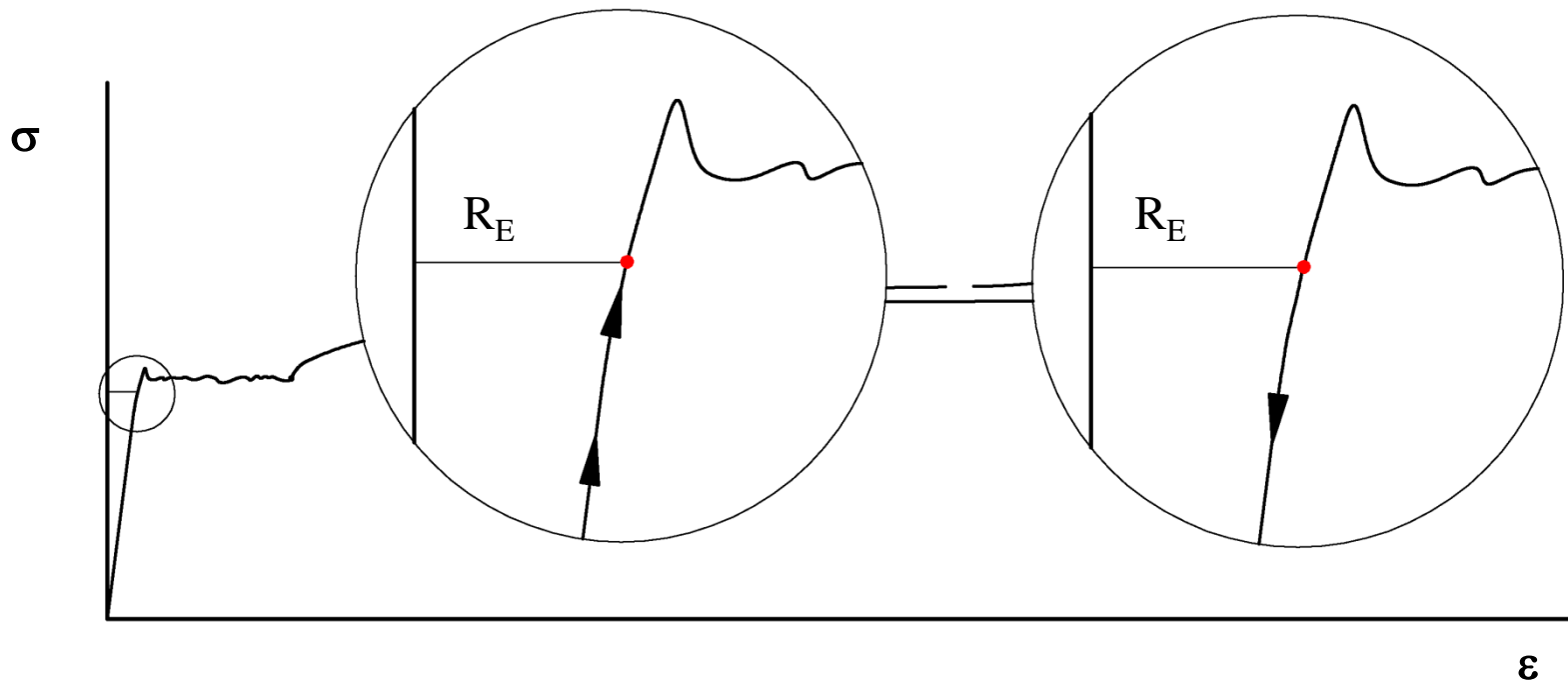
Próbka po badaniu - rozciąganie



Rys: Autor

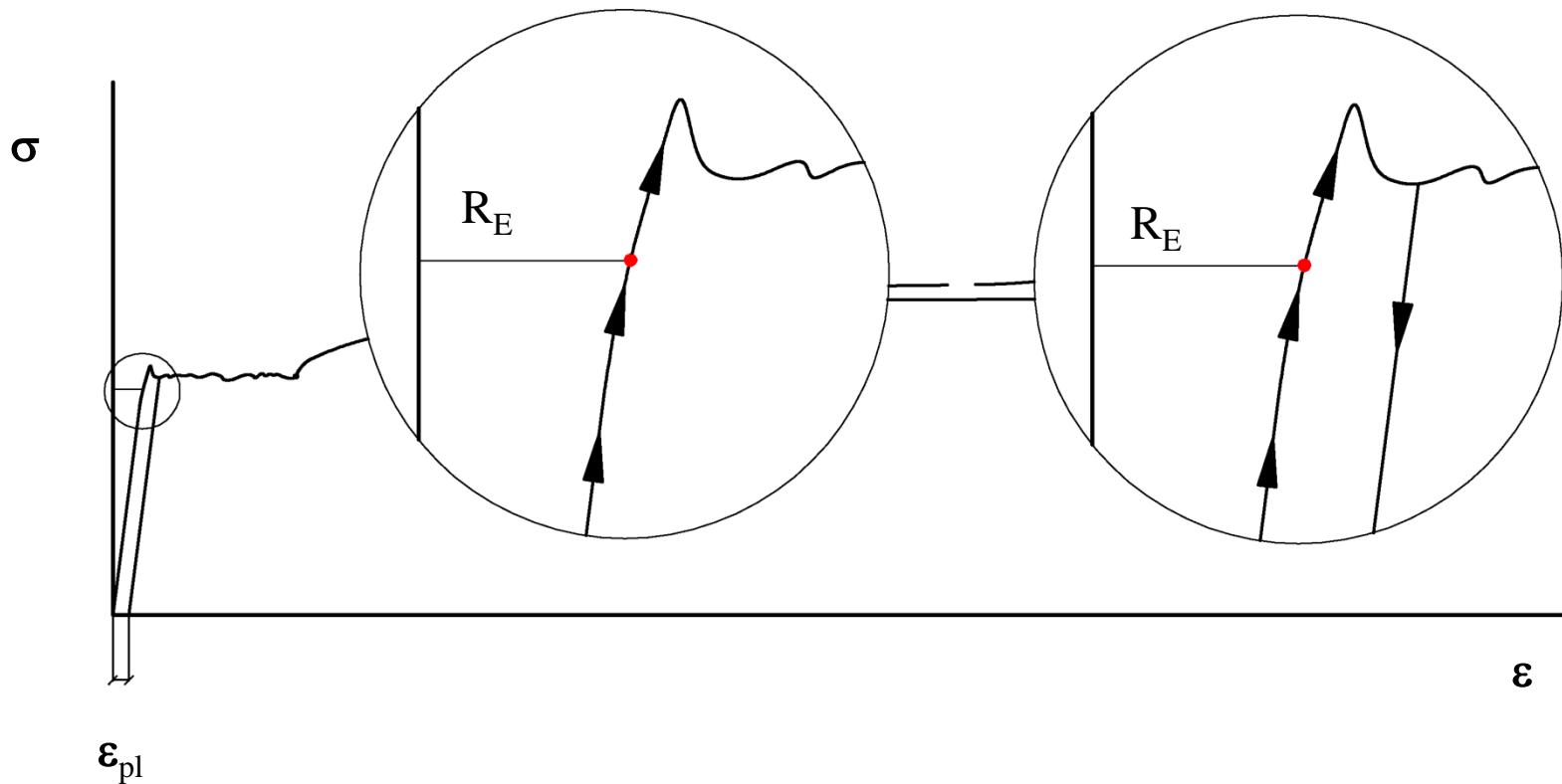
(nieformalny kształt próbki, $A = \text{const}$)

Zwiększanie i zmniejszanie naprężeń; jeżeli $\sigma \leq R_E$ (zakres sprężysty), będziemy się poruszali wciąż po tej samej linii.



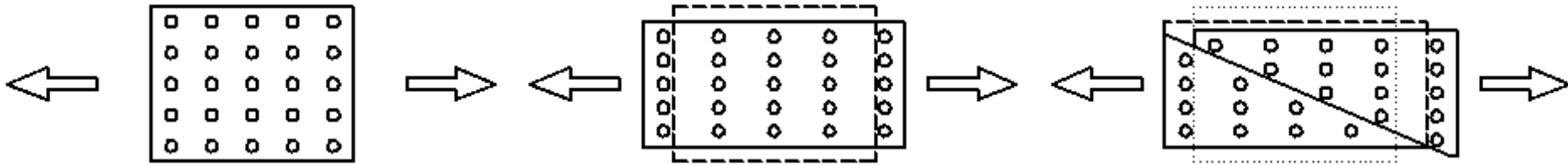
Rys: Autor

Zwiększanie i zmniejszanie naprężeń; jeżeli $\sigma > R_E$ (plastyczny), odciążenie da nową linię prostą (zakresu sprężystego), równoległą do początkowego zakresu sprężystego. W efekcie, po całkowitym odciążeniu, pojawią się niezerowe wartości deformacji plastycznych ϵ_{pl} .



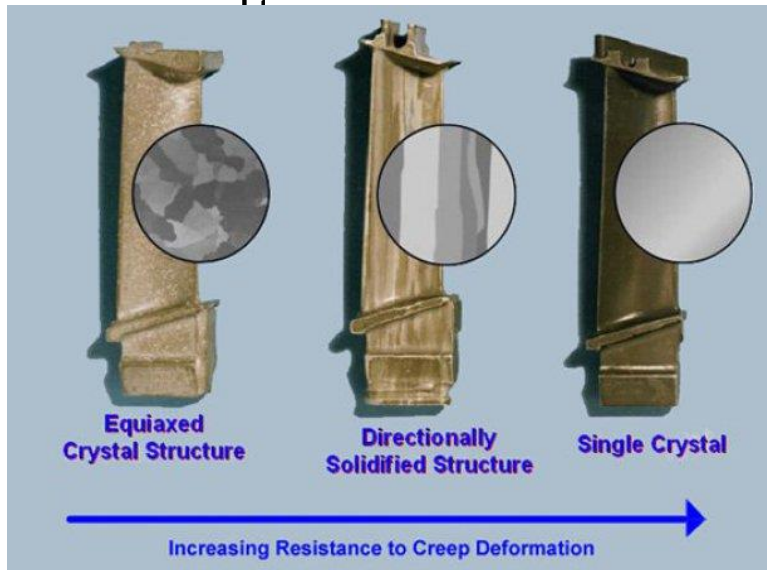
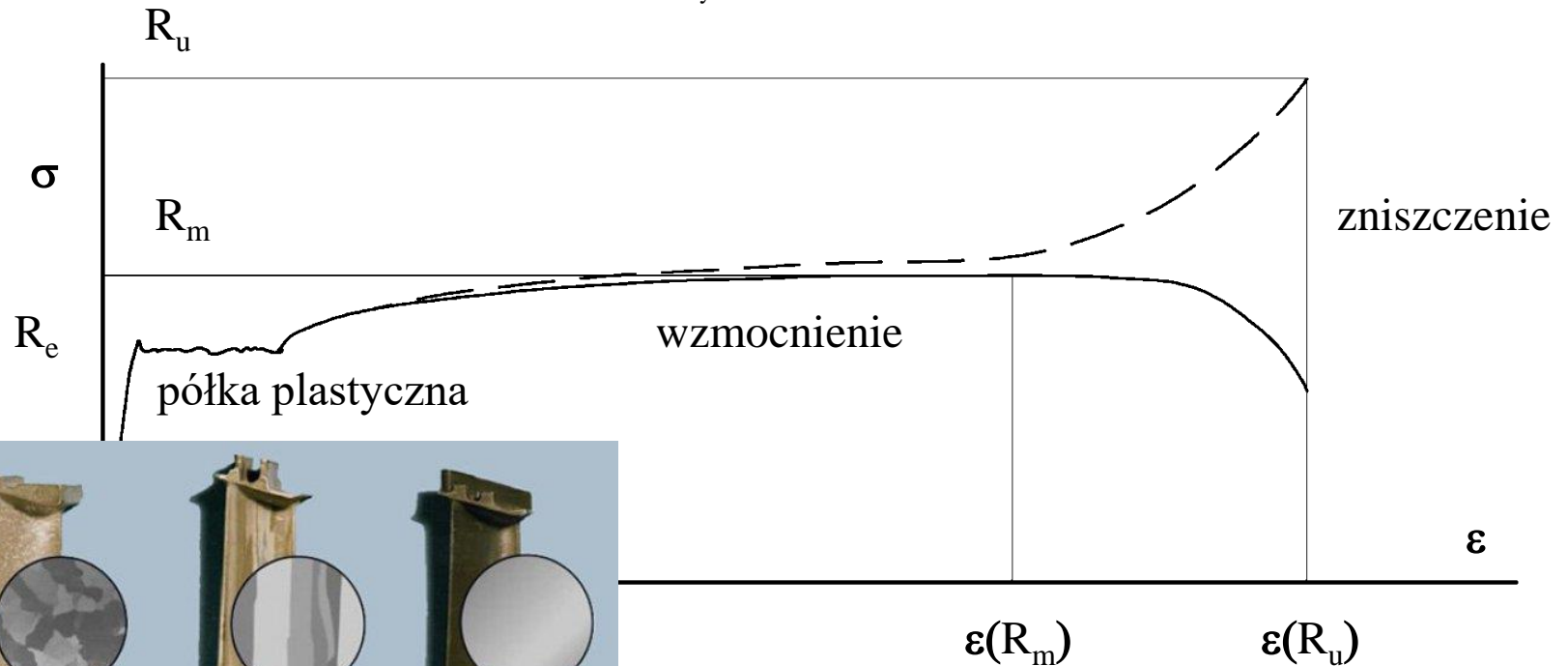
Rys: Autor

W zakresie sprężystym deformacje są efektem zmiany odległości między atomami. Jest to deformacja w pełni odwracalna – po zdjęciu obciążenia atomy wracają do położenia pierwotnych.



W zakresie plastycznym deformacje są efektem ścinania kryształów. Deformacje plastyczne są nieodwracalne. By zlikwidować odkształcenia plastyczne, konieczne jest nie tylko zdjęcie obciążenia, ale i przyłożenie dodatkowych, przeciwnie skierowanych sił.

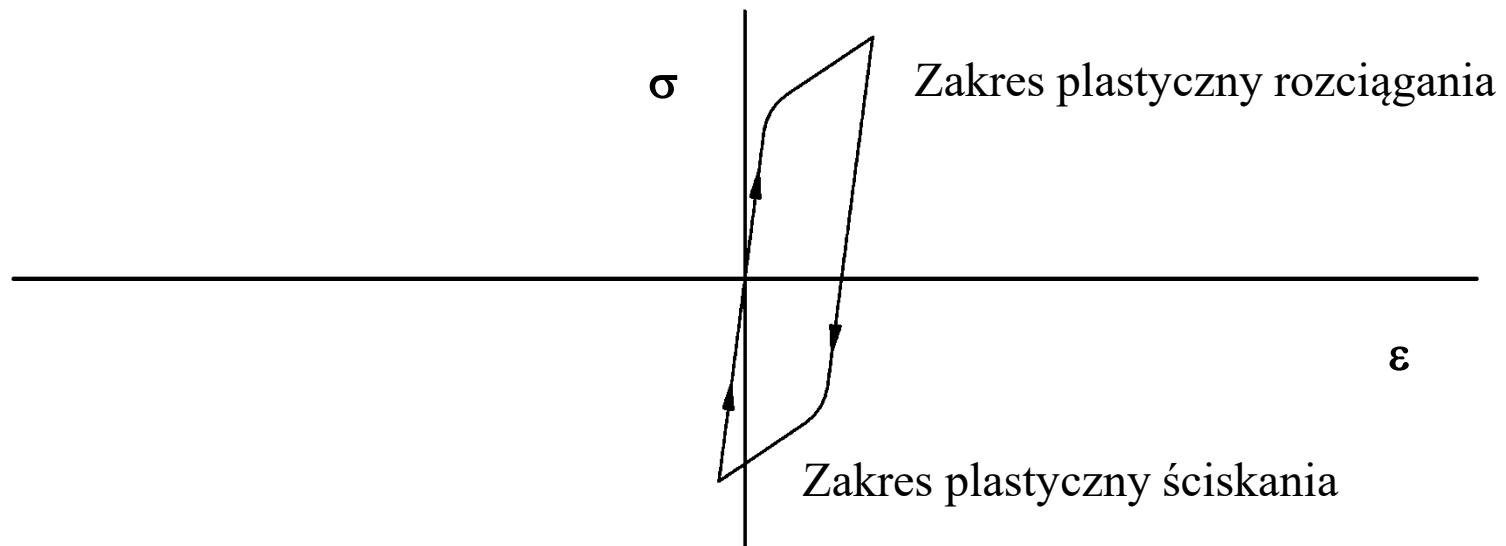
Rys: Autor



Rys: makezine.com

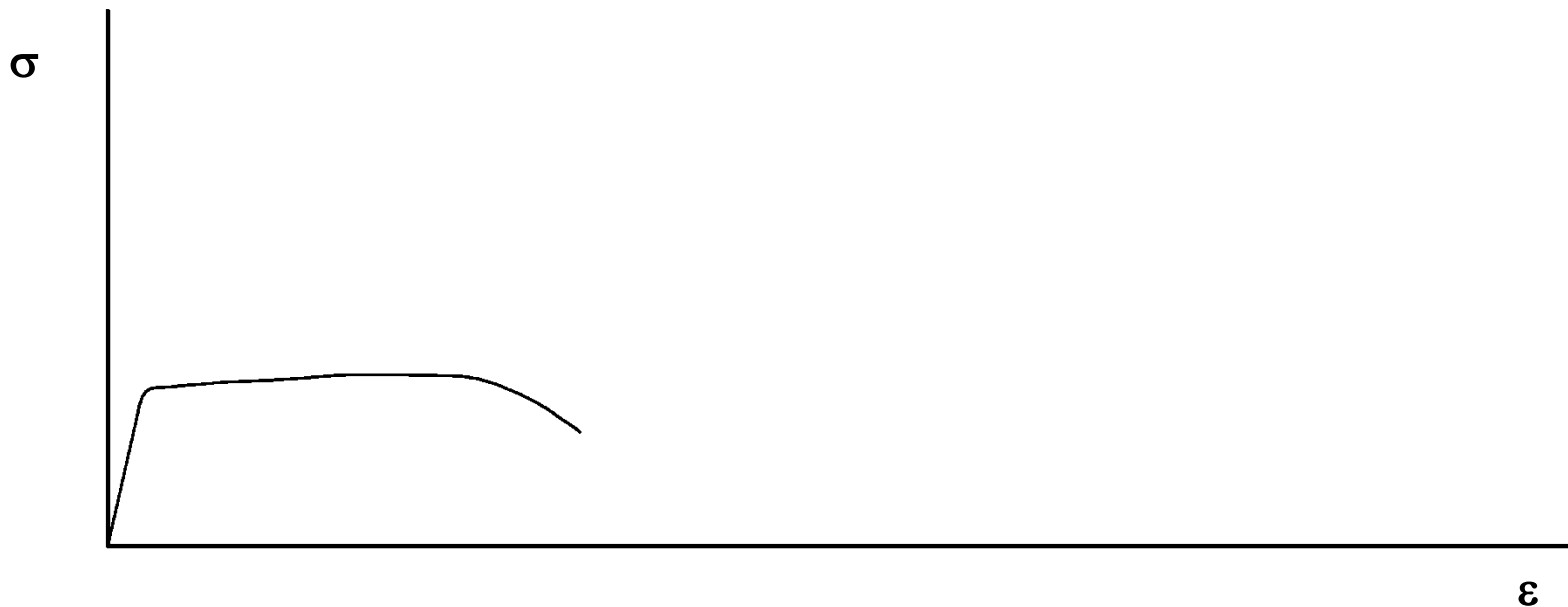
Efektym wydłużenia jest zmiana kształtu kryształów. Kryształy wydłużone równolegle do kierunku siły zaczynają stawiać opór większy niż kryształy niezdeformowane. Dlatego po półce plastycznej (R_e) następuje ponowny wzrost wytrzymałości (R_m , R_u) zwany wzmocnieniem.

Powrót do zerowej wartości odkształceń możliwy jest dopiero po ściśnięciu próbki w zakresie plastycznym.



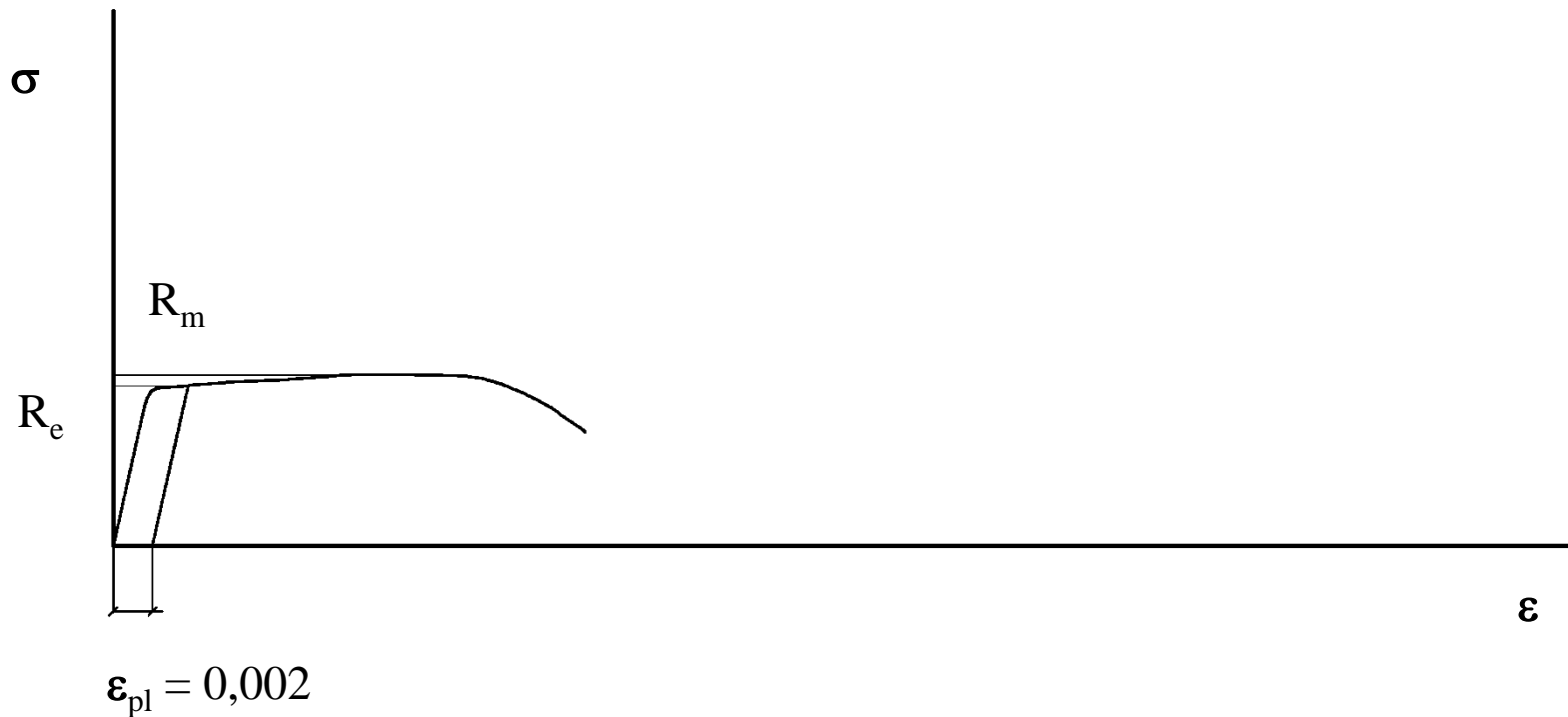
Rys: Autor

Dla aluminium i stali specjalnych nie ma półki plastycznej. Brak specyficznych zjawisk, związanych z przekroczeniem wartości R_e



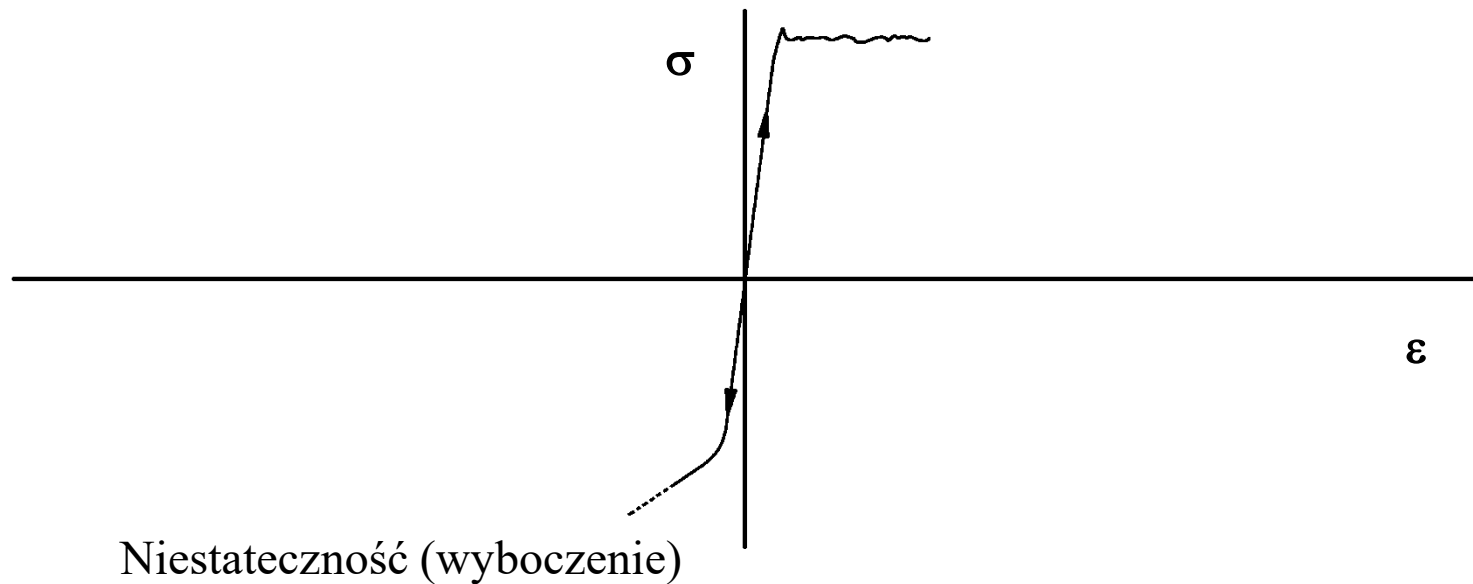
Rys: Autor

W takim przypadku jako R_e przyjmuje się taką wartość σ dla której odkształcenie plastyczne wynosi 0,2%.



Rys: Autor

W przypadku ściskania próbki nastąpi jej wyboczenie.



Rys: Autor

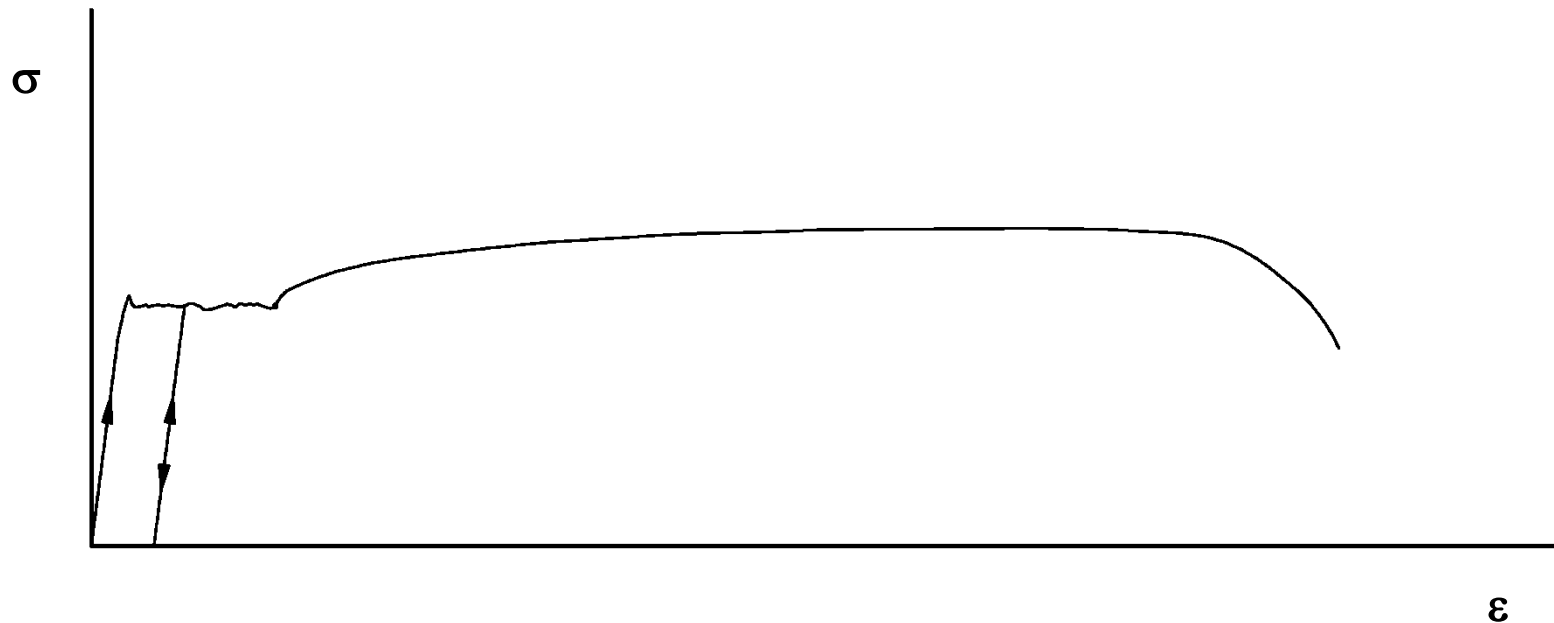
Próbka po badaniu - ściskanie



Rys: Autor

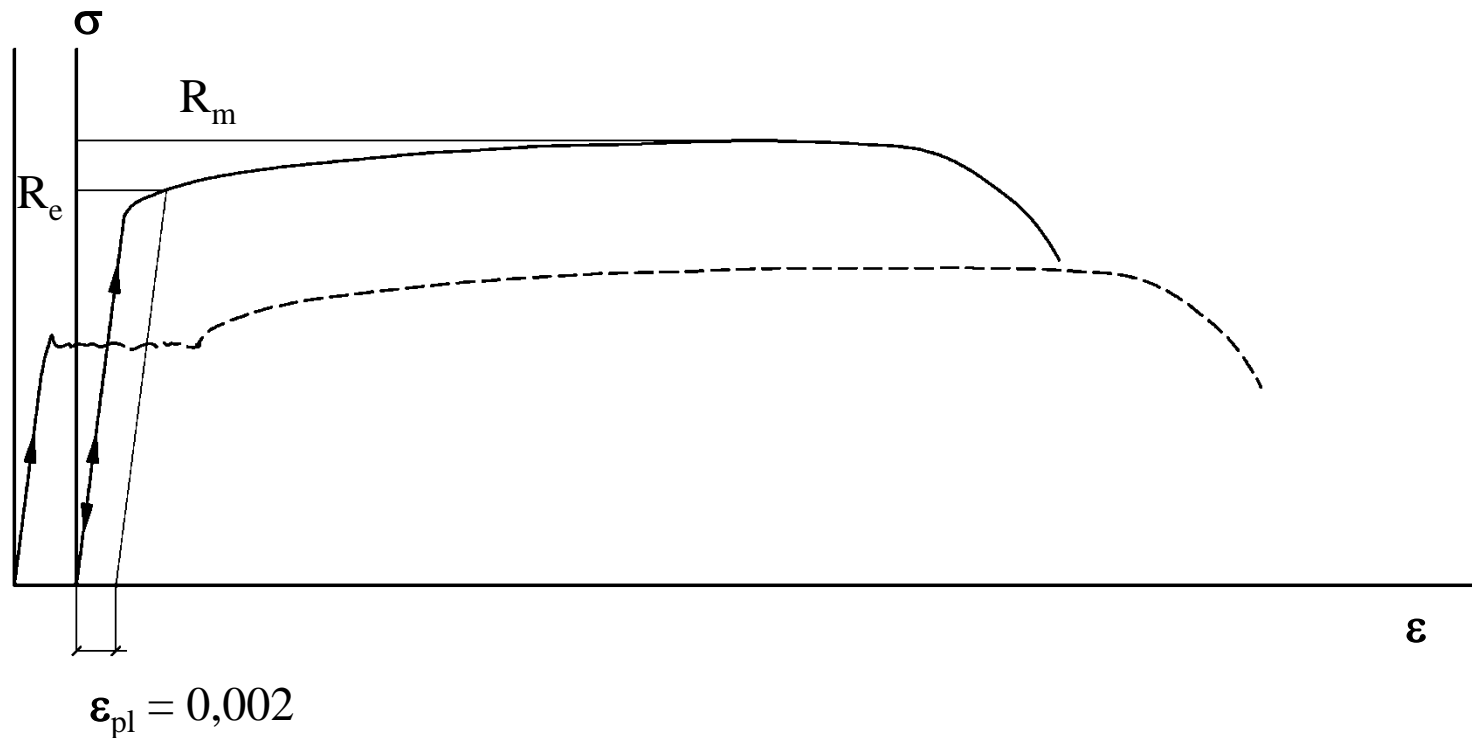
(brak informacji o parametrach mechanicznych, jedynie deformacja próbki)

Jeśli w zakresie plastycznym dokonamy odciążenia i natychmiastowego ponownego dociążenia, nie wpłynie to w istotny sposób na zmianę wykresu σ - ε .



Rys: Autor

Jeśli jednak ponowne dociążenie nastąpi w kilka dni po odciążeniu, w próbce zajdzie proces przebudowy (rekrytalizacji) ściętych kryształów. W efekcie dojdzie do całkowitej zmiany zachowania się materiału, co ujawni się w nowym kształcie wykresu σ – ϵ . Wykres trzeba będzie wykonać dla nowego położenia osi pionowej. Zniknie półka plastyczna, wartości R_e (naprężenie przy odkształceniu $\epsilon_{pl} = 0,2\%$) i R_m będą miały dużo większą wartość, niż początkowo. Maksymalne wydłużenie (wydłużenie przy zniszczeniu) będzie mniejsze niż początkowo. Zjawisko to jest wykorzystywane przy produkcji cięgien stalowych.



Rys: Autor

Analiza wyników

$R_e \rightarrow f_y$ granica plastyczności

$R_m \rightarrow f_u$ granica wytrzymałości na rozciąganie

Na przykład:

$$R_e = 285 \text{ MPa}$$

$$R_m = 400 \text{ MPa}$$

$$f_y = ?$$

$$f_u = ?$$

Wyniki – 60 próbek

#	R_e [MPa]	R_m [MPa]
1	294,8	530,5
2	268,9	437,6
3	255,6	509,2
4	255,9	431,9
5	279,2	480,3
...
60	274,8	431,8

$(R_1, R_2, R_3 \dots R_{60}) = (294,8 ; 268,9 ; 255,6 ; 255,9 ; 279,2 \dots 274,8)$

Zmiana kolejności wyników:

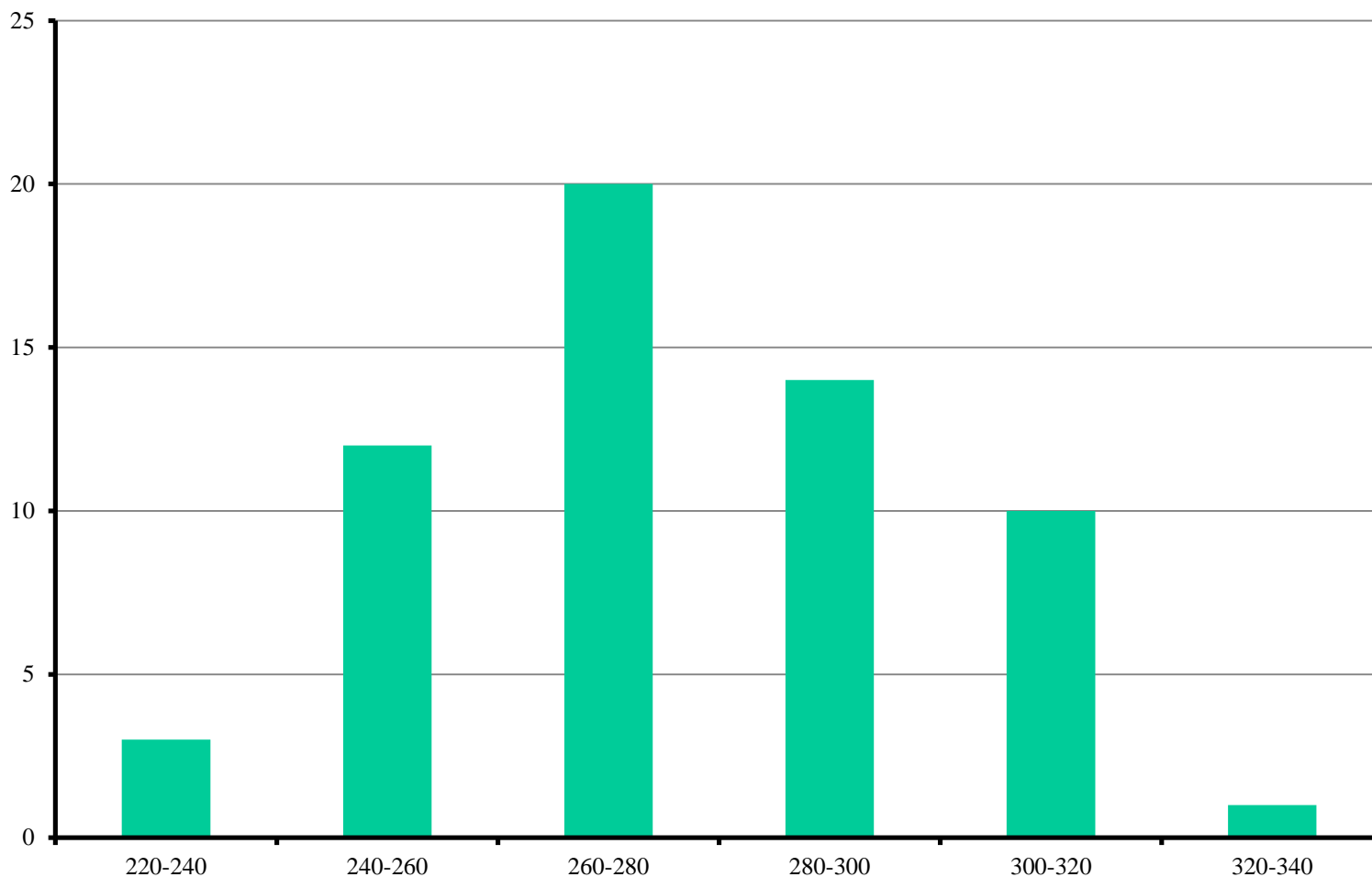
$R_a \leq R_b \leq R_c \leq \dots \rightarrow 229,2 ; 231,1 ; 237,7 ; 245,1 \dots 326,3$

$R_{\min} = 229,2 \text{ MPa}$

$R_{\max} = 326,3 \text{ MPa}$

Pogrupowanie wyników w kategorie:

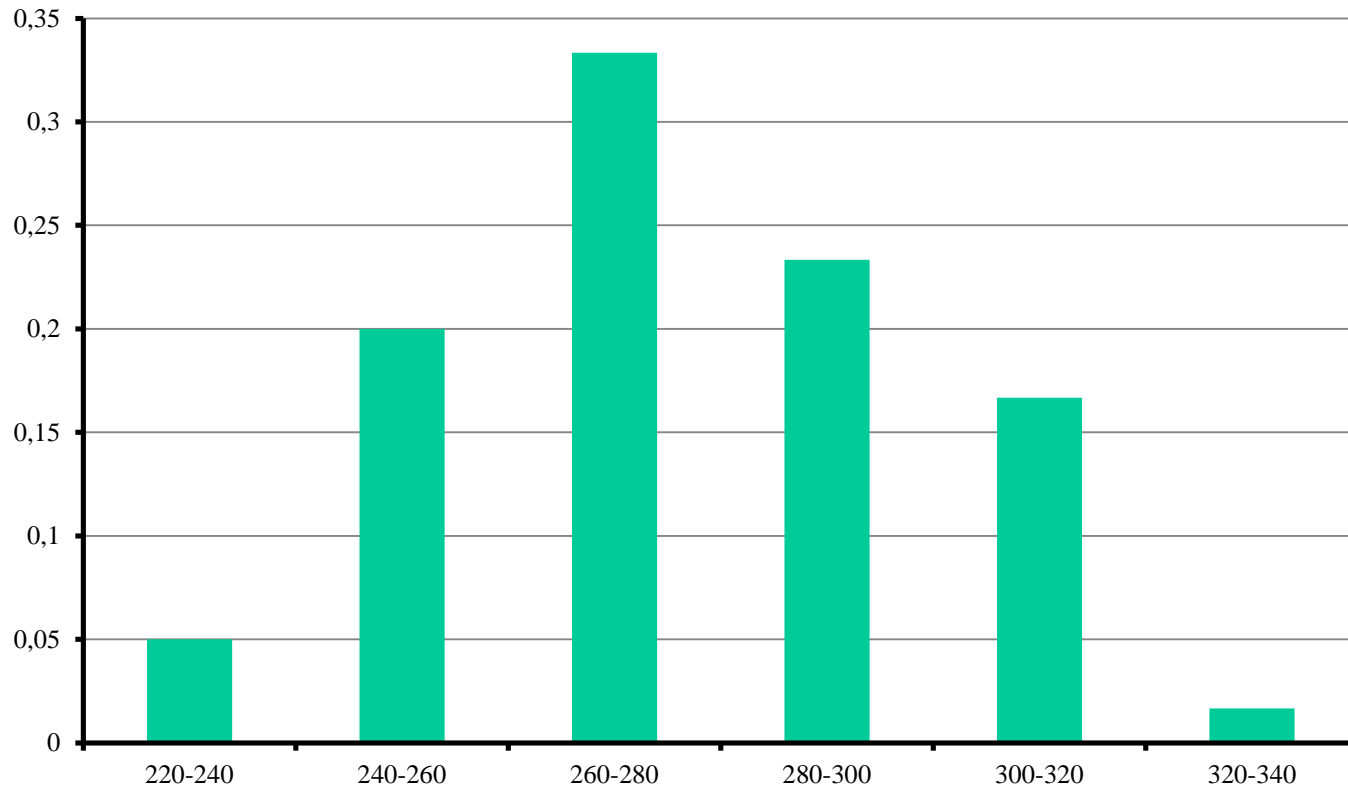
Granice [MPa] ($\Delta_R = 20 \text{ MPa}$)	220-240	240-260	260-280	280-300	300-320	320-340
Liczba wyników	3	12	20	14	10	1



Rys: Autor

Wysokość słupka = ilość wyników w kategorii / ilość wszystkich wyników

Suma wysokości wszystkich słupków = 1



Rys: Autor

Ten typ rozkładu jest opisany przez rozkład normalny (rozkład Gaussa):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{Re} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_{Re})^2}{2\sigma_{Re}^2}\right)$$

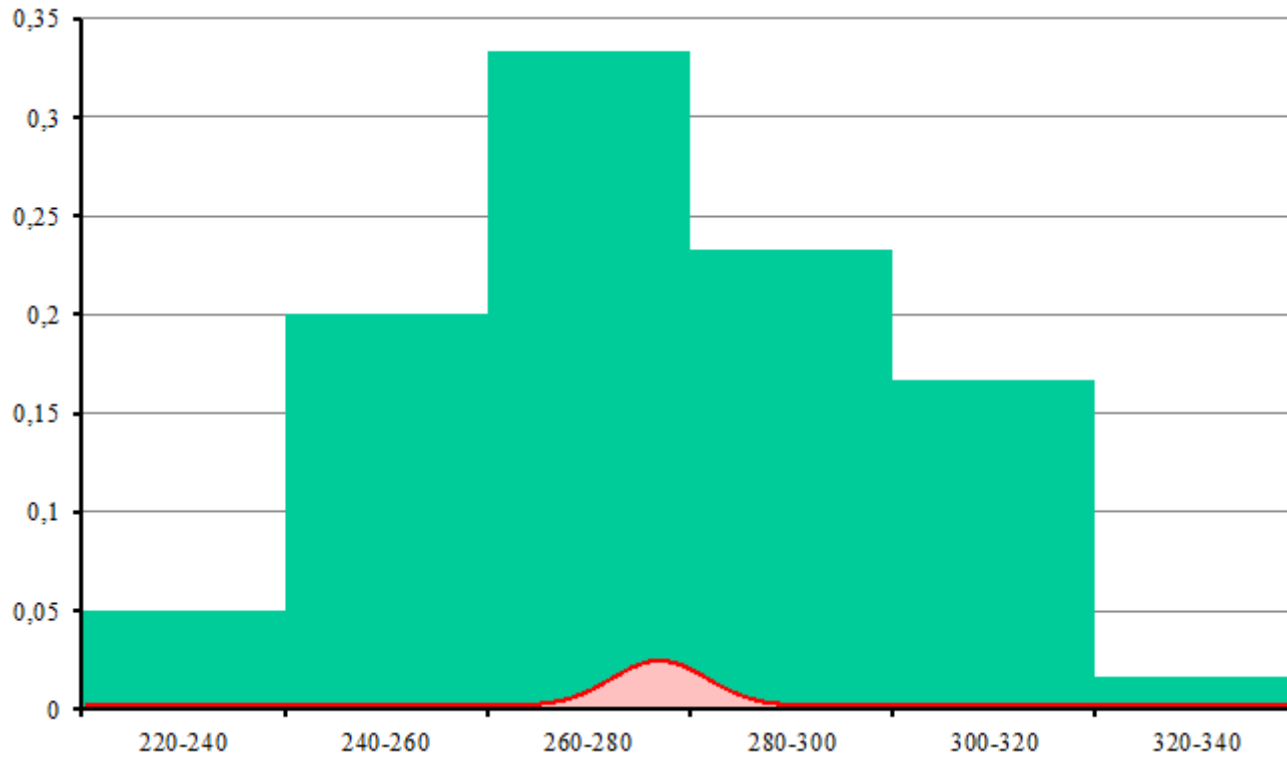
$$x = R_{e,i}$$

$$\mu_{Re} = (\sum R_{e,i}) / n \quad (\text{średnia})$$

$$\sigma_{Re} = \sqrt{\{[\sum (R_{e,i} - \mu_{Re})^2] / n\}} \quad (\text{odchylenie standardowe})$$

Analogicznie dla R_m

Rys: Autor



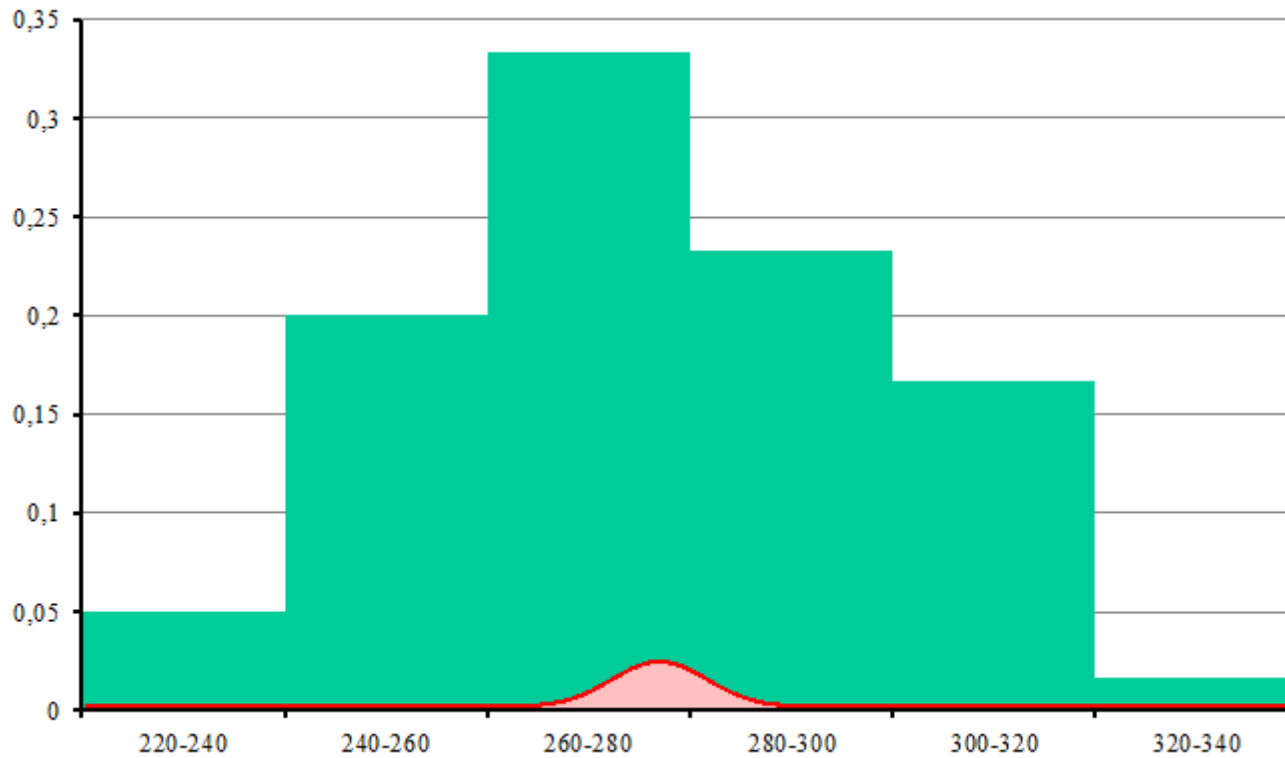
$$\mu_{Re} = 276,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Re} = 21,9 \text{ MPa}$$

Powierzchnia pod krzywą = 1

Suma wysokości słupków = 1

Rys: Autor



Wykres słupkowy: dla skończonej ilości próbek n i dla mierzalnej zmiany Δ_R (w analizowanym przykładzie, $n = 60$, $\Delta_R = 20$ MPa)

Rozkład normalny: teoretyczny kształt wykresu słupkowego dla $n \rightarrow \infty$ i $\Delta_R \rightarrow 0$

Czy jest dobrym pomysłem przyjęcie średniej jako wartości do obliczeń:

$$f_y = R_e, \text{ średnia}$$

$$f_u = R_m, \text{ średnia}$$

?

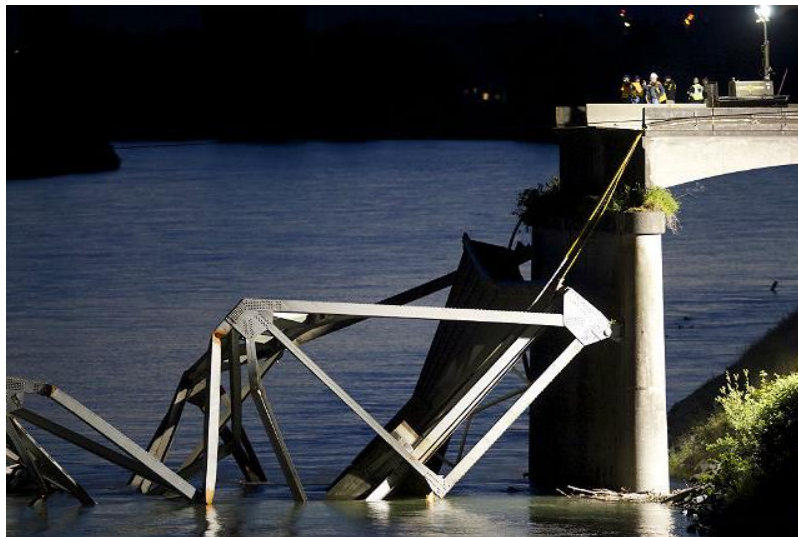
NIE!

Średnia → dla 50% elementów $f < f_{\text{średnia}}$

50% konstrukcji będzie miała wytrzymałość mniejszą, niż założona do obliczeń!



Rys: renkonstantynow.pl

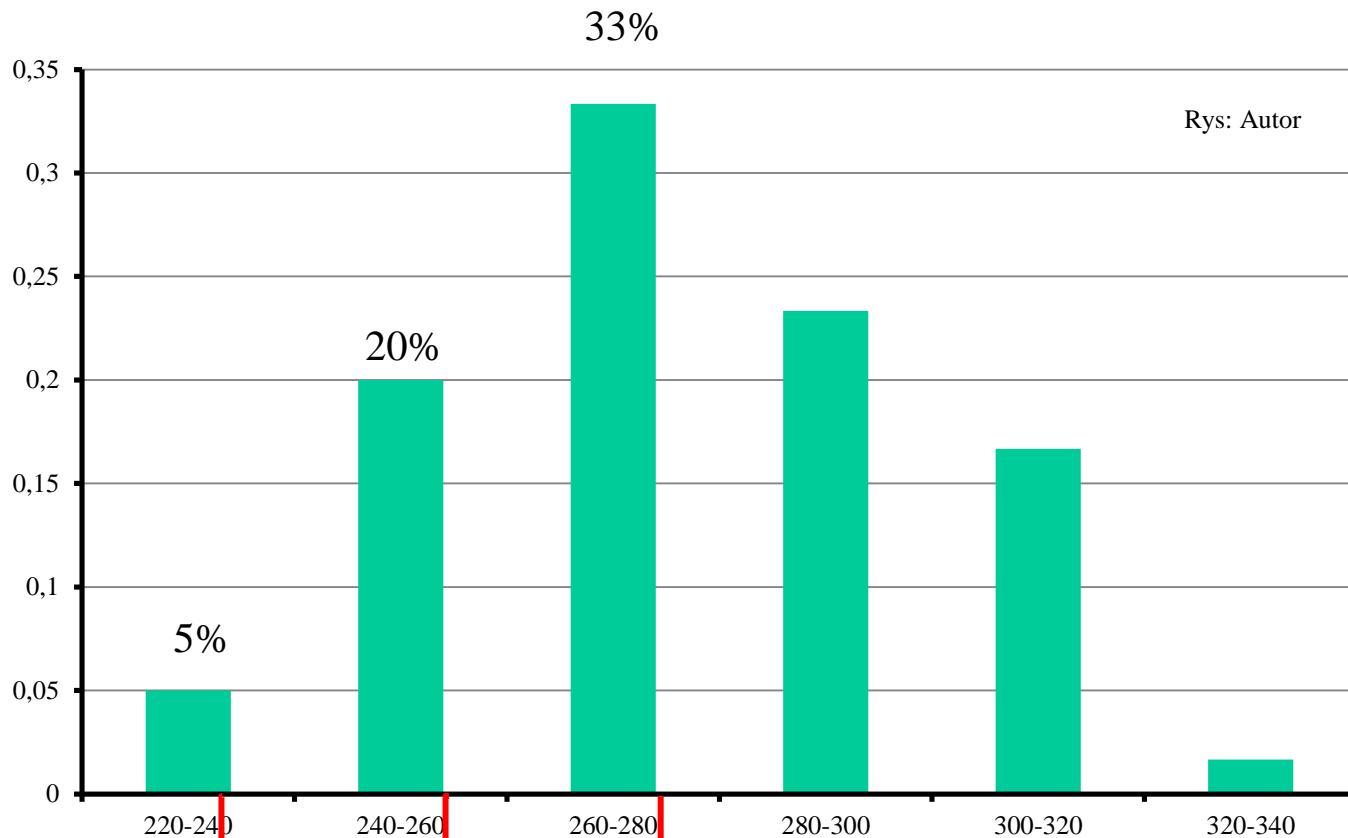


Rys: wiadomosci.wp.pl



Rys: biznes.newsweek.pl

Kwantyl: taka wartość wytrzymałości, dla której tylko N% wyników ma mniejszą wartość



Rys: Autor

Poniżej 240 MPa: 5%

Poniżej 260 MPa: 25%

Poniżej 280 MPa: 58%

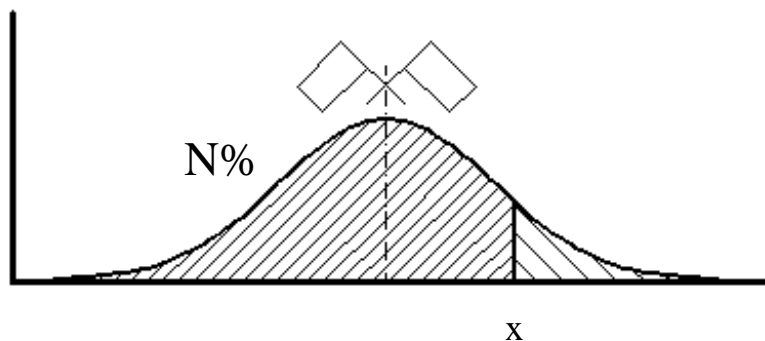
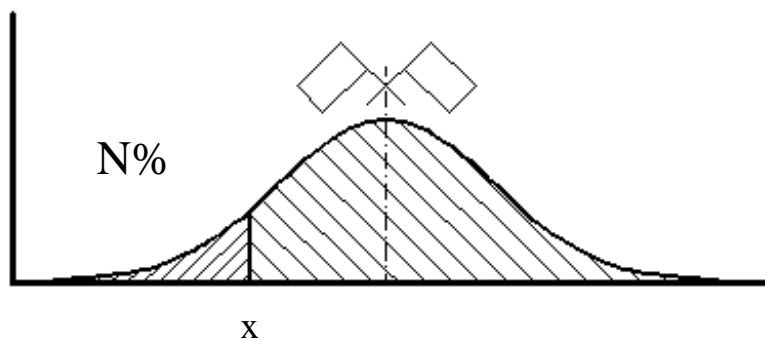
240 MPa → kwantyl 5%

260 MPa → kwantyl 25%

Średnia (276,8 MPa) → kwantyl 50%

280 MPa → kwantyl 58%

Liczenie kwantyli jest dużo dokładniejsze, gdy używamy dystrybucji, a nie wykresu:



Wartość x jest $N\%$ kwantylem:

$$N\% \text{ całkowitej powierzchni} = \int_{-\infty}^x \phi(\xi) d\xi$$

Powierzchnia pod wykresem na lewo od x

(Użyto symbolu $d\xi$ zamiast dx by uniknąć konfliktu oznaczeń)

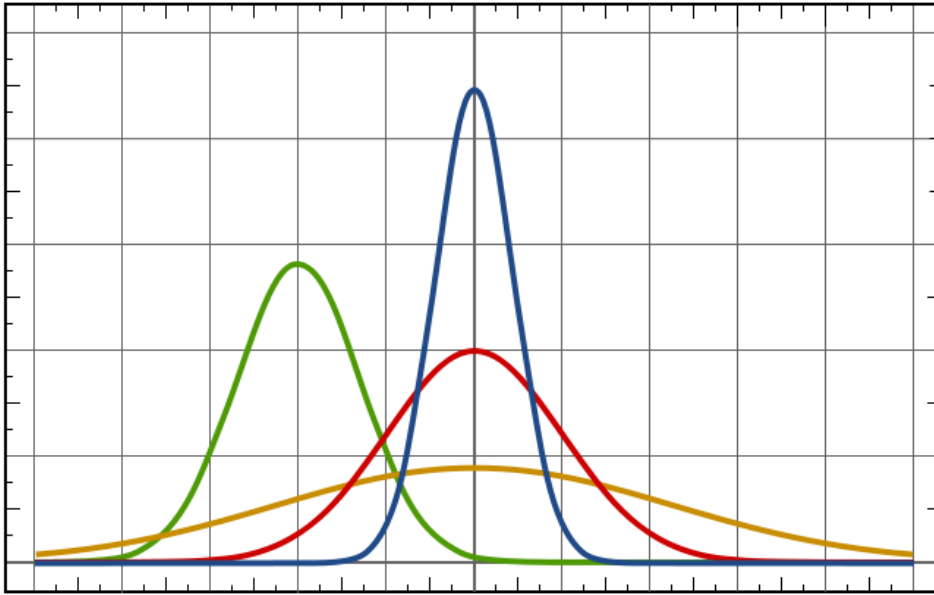
Można zagadnienie analizować jako pola powierzchni pod wykresami. Lepiej jednak używać specyficznych, matematycznych definicji:

$\phi(\xi)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa danego rozkładu (tutaj: rozkładu normalnego)

$$\Phi(\xi) = \int_{-\infty}^{\xi} \phi(\xi) d\xi - \text{dystrybuanta}$$

$$d / d\xi [\Phi(\xi)] = \Phi(\xi)' = \phi(\xi)$$

Jesteśmy w stanie narysować wykres $\phi(\xi)$, i oczywiście, także wykres $\Phi(\xi)$.



Rys: wikipedia

Przykłady dystrybuant
dla rozkładu normalnego

$$F(-\infty) = 0,0$$

$$F(x_{\text{średnie}}) = 0,5$$

$$F(\infty) = 1,0$$

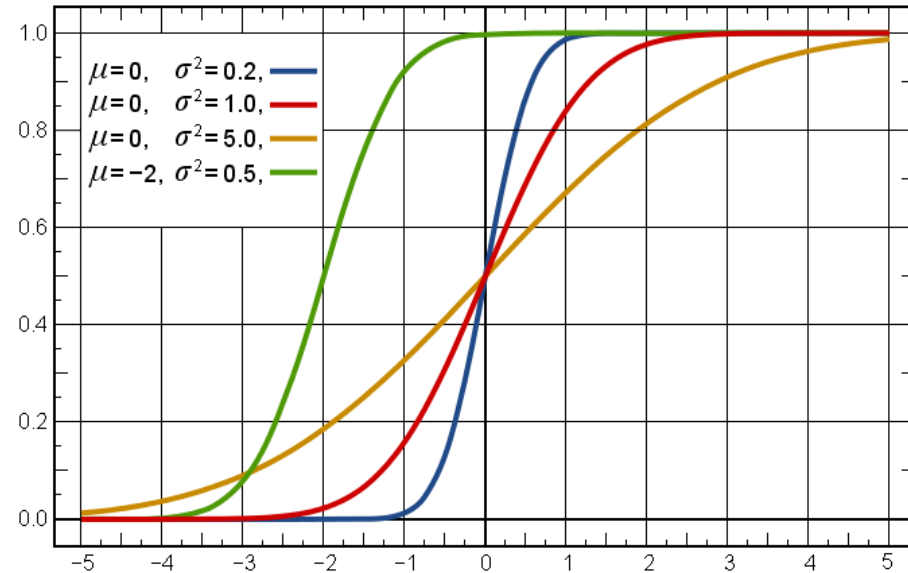
Przykłady
rozkładu normalnego

$$f(-\infty) = 0,0$$

$$f(x_{\text{średnie}}) = \max$$

$$f(\infty) = 0,0$$

Rys: wikipedia



Oczywiście pole powierzchni pod wykresem i dystrybuanta opisane są tym samym wzorem:

$$N\% = A(x) = \int_{-\infty}^x \phi(\xi) d\xi = \Phi(x)$$

$$0,0 \leq \Phi(x) \leq 1,0$$

Zależność $\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(\xi) d\xi$ może być analizowana „w dwu kierunkach”:

- od wartości x do $\Phi(x)$ (policzenie dystrybuanty);
- od wartości $\Phi(x)$ do x (liczenie odwrotności funkcji $[\Phi(x)]^{[-1]}$);

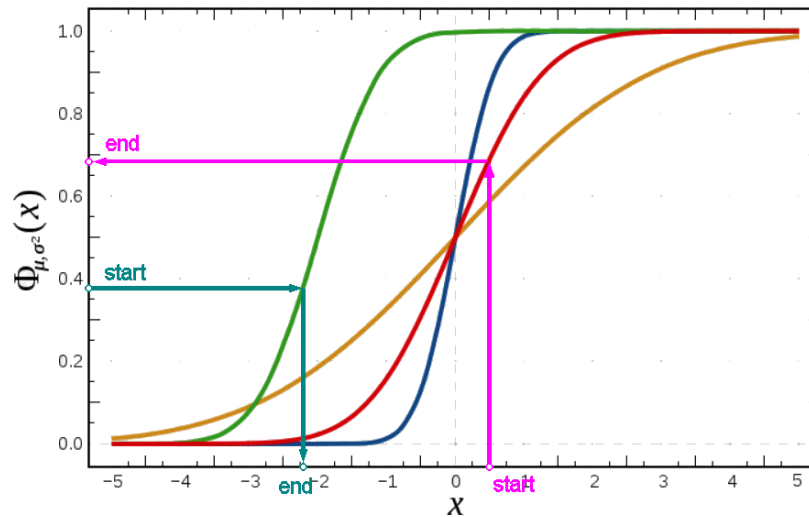
Na przykład:

$$\Phi(x) = x^2 \quad ; \quad x = 5 \rightarrow \Phi(x) = 5^2 = 25$$

$$x = [\Phi(x)]^{[-1]} = \sqrt{[\Phi(x)]} \quad ; \quad \Phi(x) = 49 \rightarrow x = \sqrt{49} = 7$$

Specyficzne nazewnictwo w analizie statystycznej:

- obliczenia $\Phi = A_{\text{left}}$ dla znanej wartości x (górnjej granicy całkowania);
- obliczenia x (górnjej granicy całkowania) dla znanej wartości $\Phi = A_{\text{left}}$;



Rys: Autor

Przypadek pierwszy to obliczenie wartości dystrybuanty.

Przypadek drugi to obliczanie kwantylu.

Wartość charakterystyczna wytrzymałości to 5% kwantyl z testu

Obliczenie N% kwantyla oblicza się w oparciu o μ_{Re} (średnią) i σ_{Re} (odchylenie standardowe). Dla 5%, przy rozkładzie Gaussa, wynik obliczeń jest następujący:

$$f_{y,k} = \mu_{Re} - 1,645 \sigma_{Re}$$

Dla danych pokazanych na #t / 32, gdy $\mu_{Re} = 276,8$ MPa oraz $\sigma_{Re} = 21,9$ MPa:

$$f_{y,k} = 240,8 \text{ MPa}$$

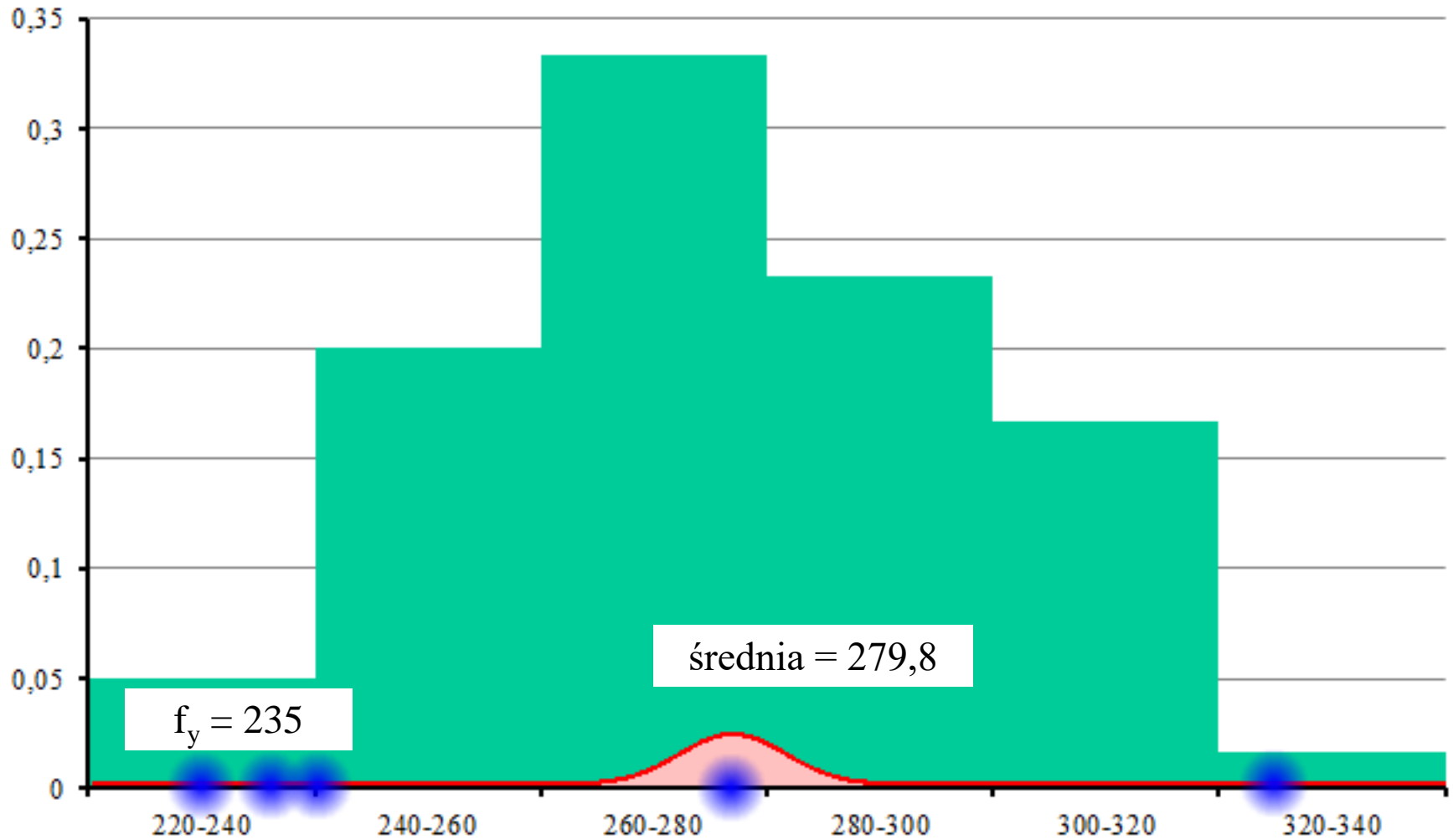
Oznacza to stal S235 ($f_{y,k} = 235$ MPa)

Wartość obliczeniową uzyskuje się przez podzielenie wartości charakterystycznej przez współczynnik bezpieczeństwa:

$$f_y = f_k / \gamma_M$$

Zgodnie z EN 1990, $\gamma_M = 1,0$.

Rys: Autor

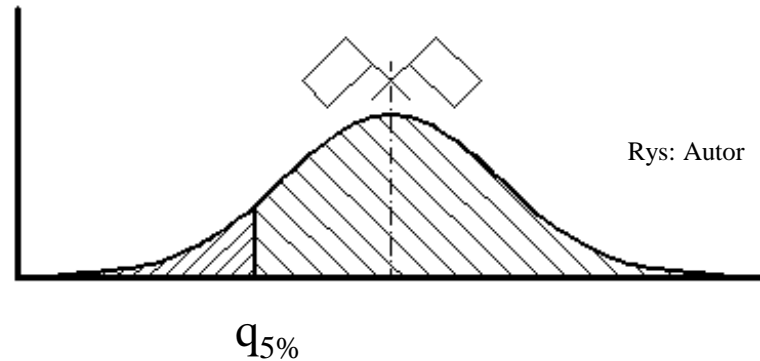


min = 229,2

kwantyl 5% = 240,8

max = 326,3

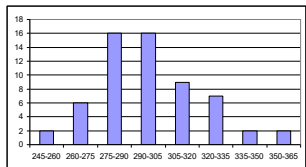
$A_{\text{left}} = 5\%$ całkowitego pola powierzchni



W sytuacji idealnej, 5% z 60 rezultatów to 3 wyniki. Mniejsze od 240,8 są: 229,2; 231,2; 237,7. W analizowanym przypadku dokładnie 5% wyników jest mniejsze od kwantyla.

Algorytm:

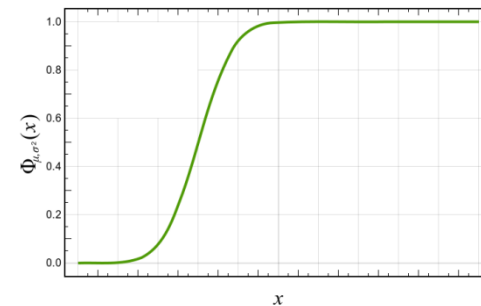
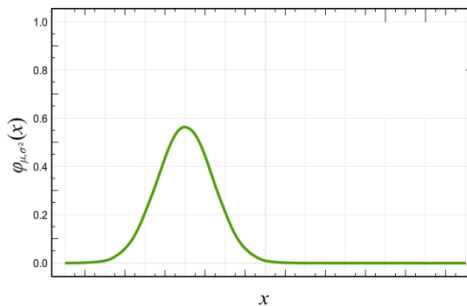
Wynik badań



μ_{Re} , σ_{Re}



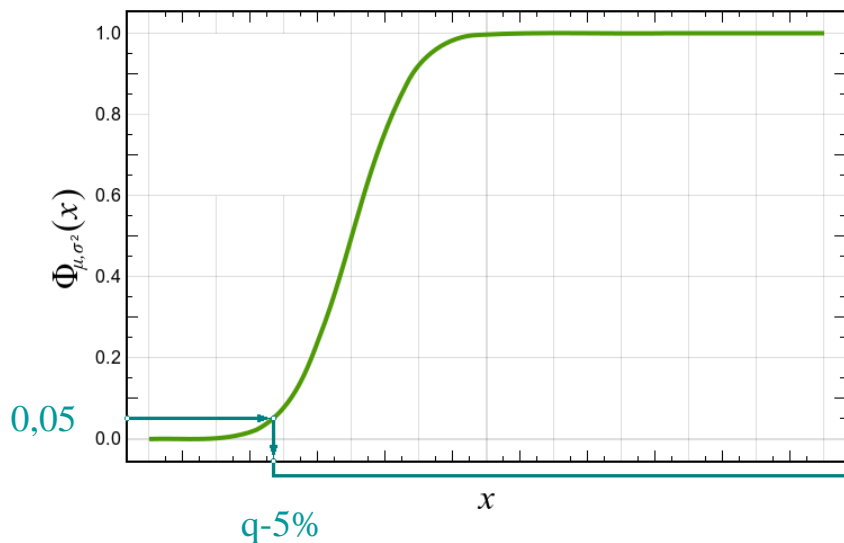
Rozkład normalny (μ_{Re} , σ_{Re})



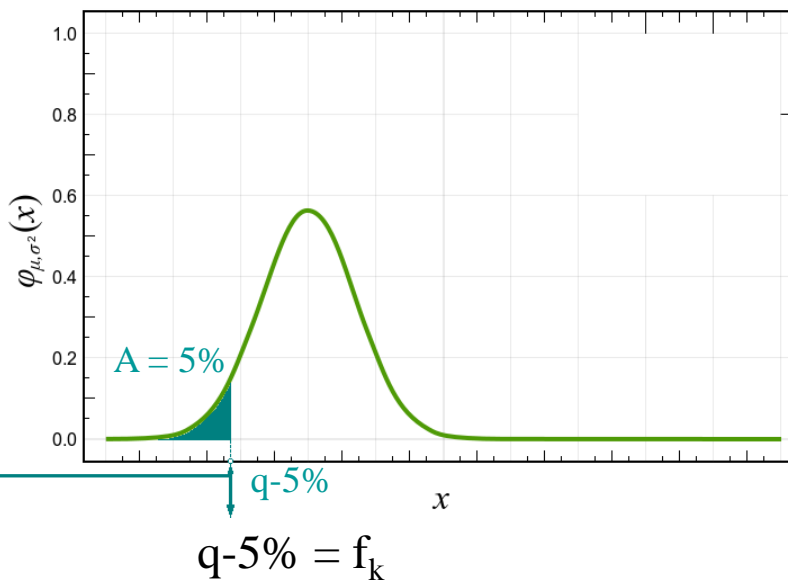
Dystrybuanta (μ_{Re} , σ_{Re})

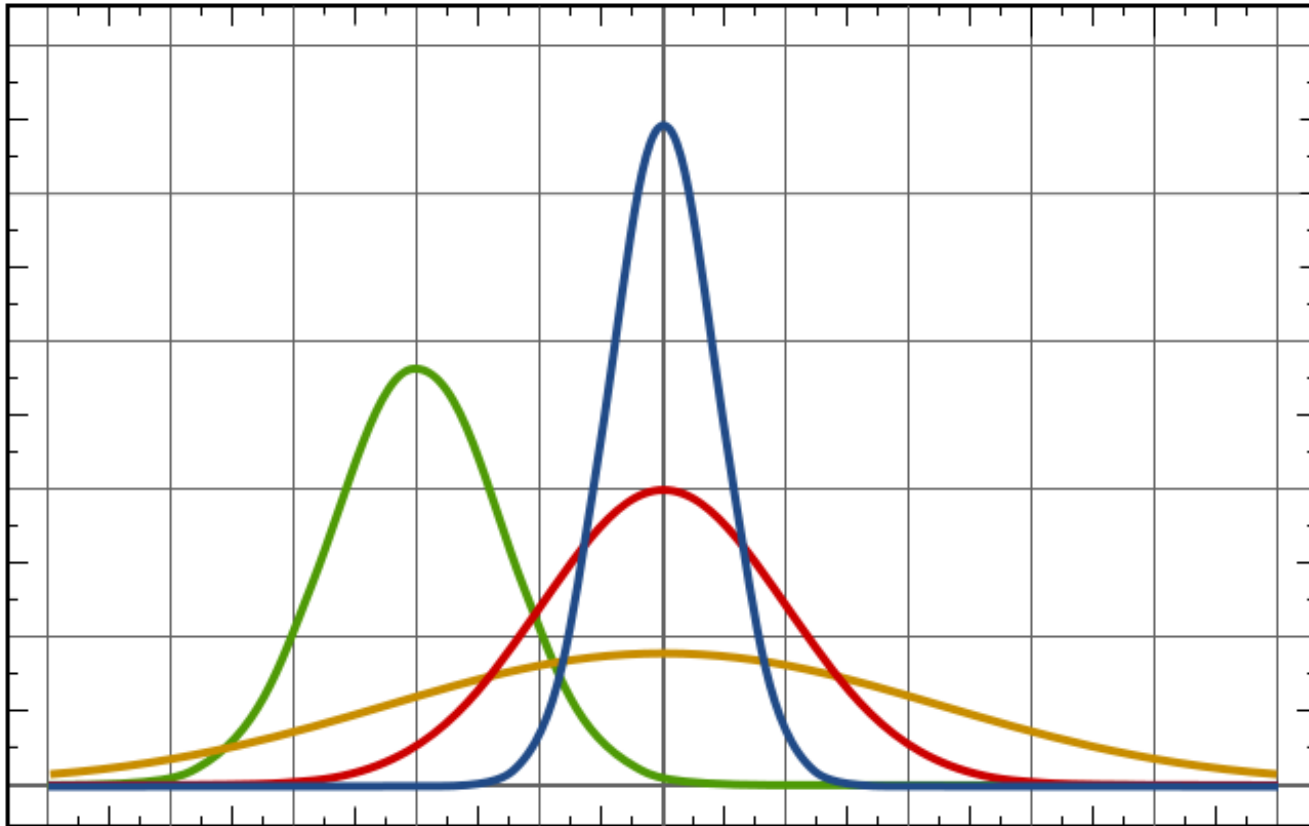
Rys: Autor

Dystrybuanta (μ_{Re} , σ_{Re})



Rozkład normalny (μ_{Re} , σ_{Re})



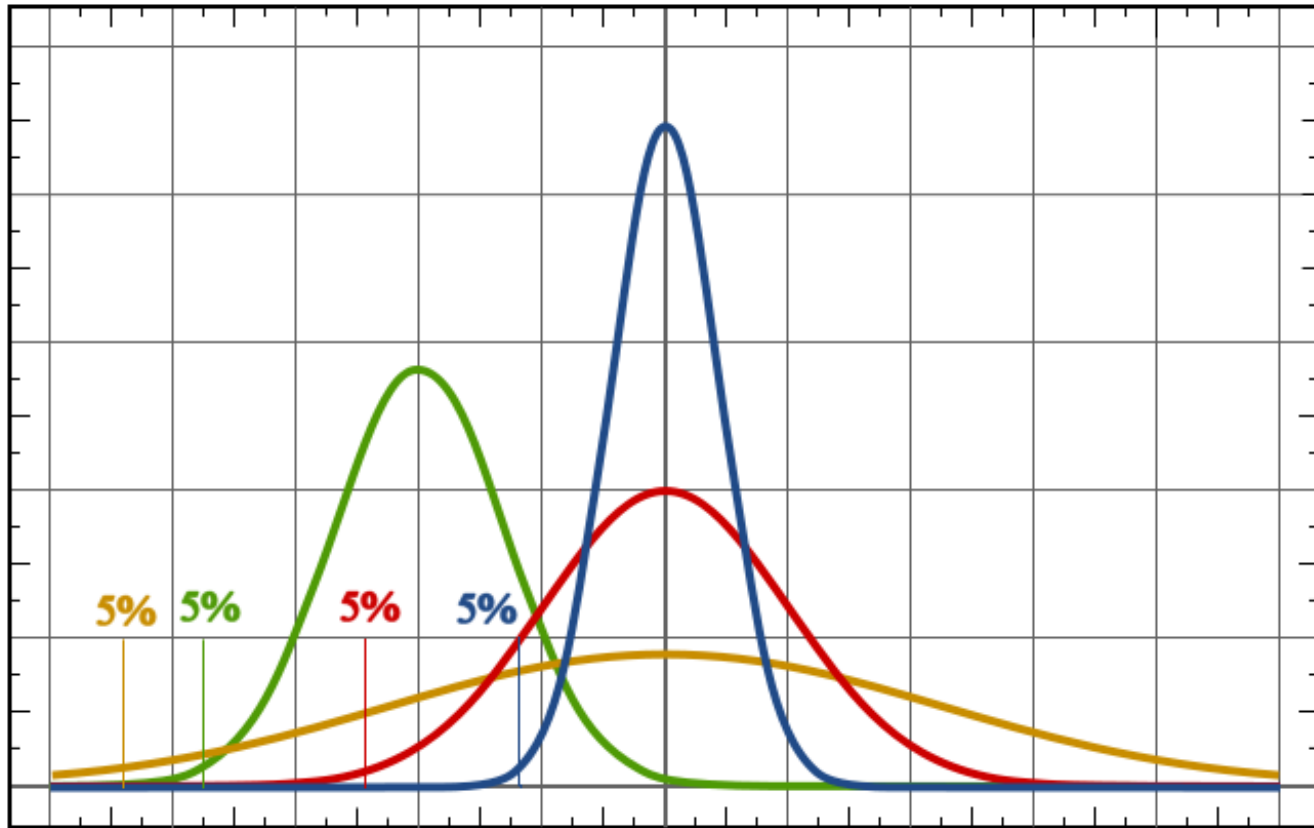


Rys: wikipedia

średnia = średnia = średnia

odchylenie standardowe < odchylenie standardowe < odchylenie standardowe

powierzchnia = powierzchnia = powierzchnia = powierzchnia = 1,0



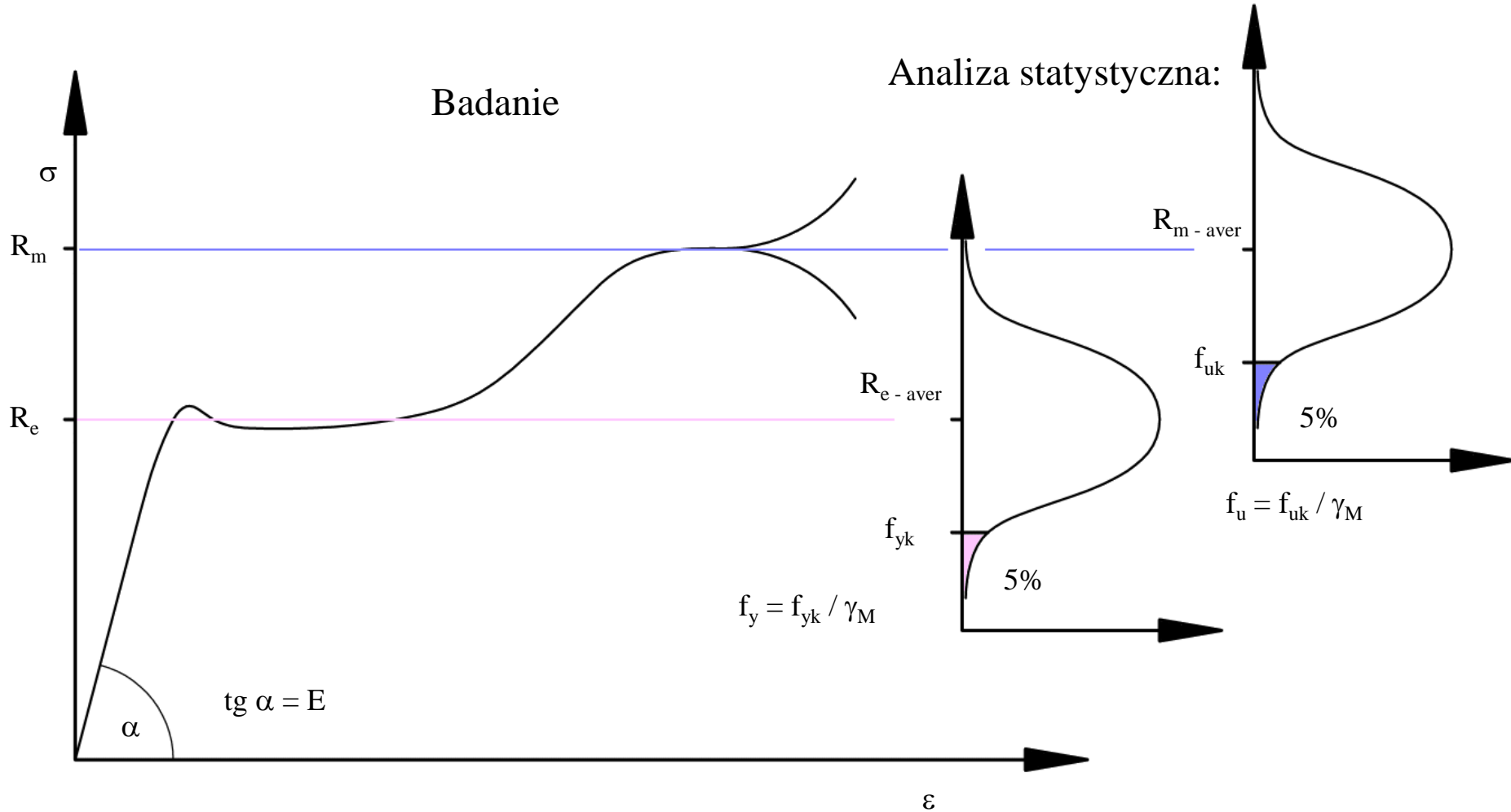
Rys: wikipedia

koszty produkcji < koszty produkcji ≈ koszty produkcji ≈ koszty produkcji

$$f_y < f_y < f_y < f_y$$

$$\text{cena} < \text{cena} < \text{cena} < \text{cena}$$

Podsumowanie:



Rys: Autor

EN 1993-1-1 tab 3.1

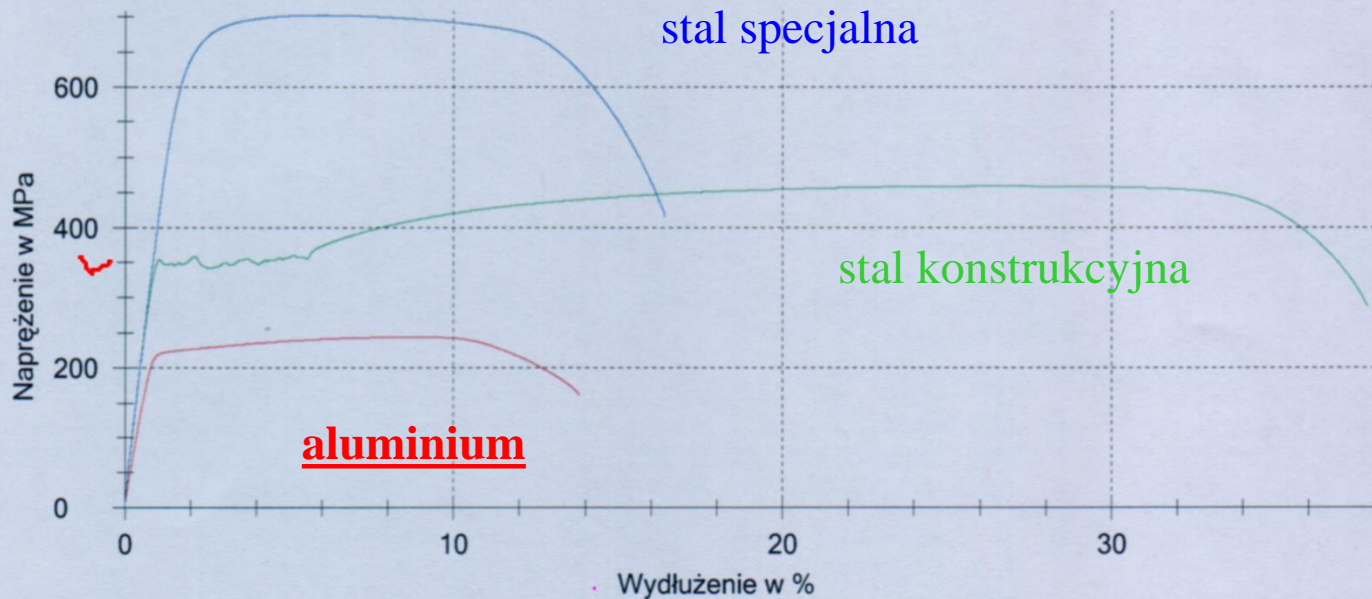
Tablica 3.1: Nominalne wartości granicy plastyczności f_y i wytrzymałości na rozciąganie f_u dla stali konstrukcyjnej walcowanej na gorąco

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 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

Wyniki badania:

Legenda	Nr	L_0 mm	S_0 mm ²	$R_{p0.2}$ MPa	R_{eH} MPa	R_{eL} MPa	F_m MPa	R_B MPa	F_m kN	A_{gt} %	Z %
■	6	100,40	78,54	-	-	-	244	161	19,14	8,68	-
■	7	120,28	113,10	-	354	342	459	287	51,95	26,61	-
■	8	120,19	113,10	-	-	-	702	415	79,43	6,15	-

Wykres serii:



Rys: Autor

Aluminium: inne symbole

$$R_{02} \rightarrow f_o$$

$$R_m \rightarrow f_u$$

EN 1999-1-1 tab 3.2

Stop EN- AW	Odmiana ¹⁾	Grubość mm ¹⁾	f_o ¹⁾	f_u	A_{30} ¹⁾⁶⁾	$f_{0,2ac}$ ²⁾	$f_{0,5ac}$ ²⁾	Współczynniki redukcyjne ²⁾		BC 4)	n_p 1), 5)
			N/mm ²	%	N/mm ²		$\rho_{0,2ac}$ ¹⁾	$\rho_{0,5ac}$			
3004	H14 H24/H34	≤ 6 3	180 170	220	1 3	75	155	0,42 0,44	0,70	B	23 18
	H16 H26/H36	≤ 4 3	200 190	240	1 3			0,38 0,39	0,65	B	25 20
3005	H14 H24	≤ 6 3	150 130	170	1 4	56	115	0,37 0,43	0,68	B	38 18
	H16 H26	≤ 4 3	175 160	195	1 3			0,32 0,35	0,59	B	43 24
3103	H14 H24	≤ 25 12,5	120 110	140	2 4	44	90	0,37 0,40	0,64	B	31 20
	H16 H26	≤ 4	145 135	160	1 2			0,30 0,33	0,56	B	48 28
5005/ 5005A	O/H111	≤ 50	35	100	15	35	100	1	1	B	5
	H12 H22/H32	≤ 12,5	95 80	125	2 4	44	100	0,46 0,55	0,80	B	18 11
	H14 H24/H34	≤ 12,5	120 110	145	2 3			0,37 0,40	0,69	B	25 17
5052	H12 H22/H32	≤ 40	160 130	210	4 5	80	170	0,50 0,62	0,81	B	17 10
	H14 H24/H34	≤ 25	180 150	230	3 4			0,44 0,53	0,74	B	19 11
5049	O / H111	≤ 100	80	190	12	80	190	1	1	B	6
	H14 H24/H34	≤ 25	190 160	240	3 6	100	190	0,53 0,63	0,79	B	20 12
5454	O/H111	≤ 80	85	215	12	85	215	1	1	B	5
	H14 H24/H34	≤ 25	220 200	270	2 4	105	215	0,48 0,53	0,80	B	22 15
.....	O/H111	≤ 100	80	190	12	80	190	1	1	B	6

Inne parametry mechaniczne

Twardość #t / 59

Udarność #t / 67

Sprężystość #t / 74

Ciągliwość / plastyczność #t / 75

Kowalność #t / 76

Ścieralność #t / 77

Wytrzymałość zmęczeniowa #t / 78

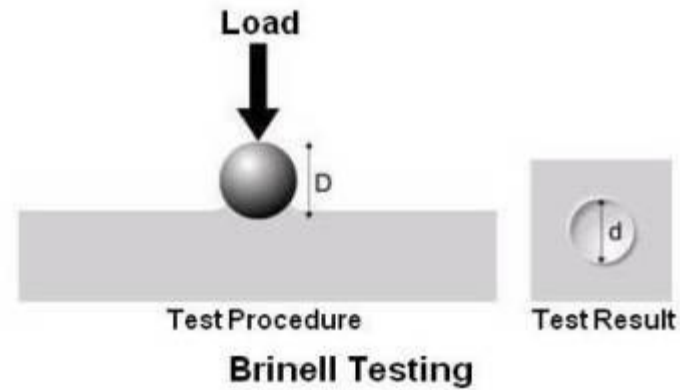
Spawalność #t / 83

Kruchość #t / 84

Twardość

odporność na działanie sił skupionych

- Brinell
- Vickers
- Rockwell



- Poldi

Rys: practicalmaintenance.net

Brinell (EN ISO 6506)

$$HB = 0,204 P / \{ \pi D [D - \sqrt{(D^2 - d^2)}] \} \text{ [kg/m}^2\text{] or [N/m}^2\text{]}$$

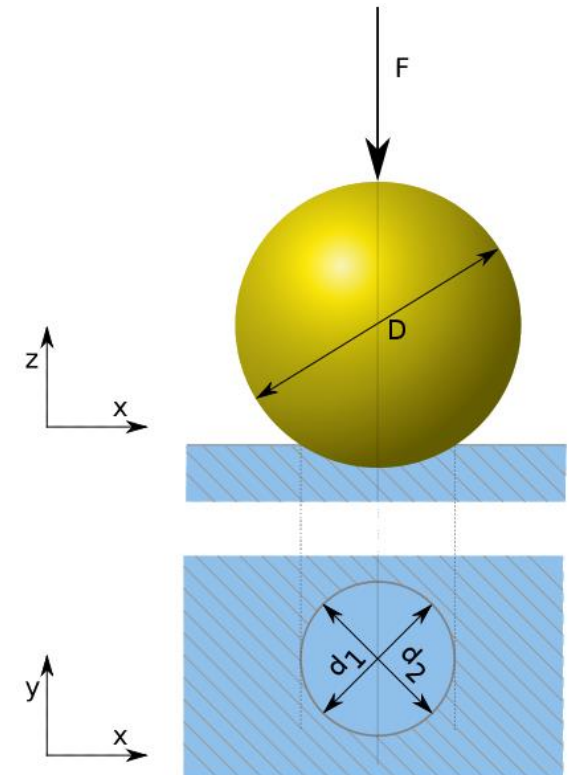
$$d = (d_1 + d_2) / 2$$

$$\text{[N/m}^2\text{]} R_m \approx 3,33 HB \text{ (125 < HB < 175) [kg/m}^2\text{]}$$

$$\text{[N/m}^2\text{]} R_m \approx 3,53 HB \text{ (HB > 175) [kg/m}^2\text{]}$$

$$\text{[N/m}^2\text{]} R_m \approx 0,34 HB \text{ [N/m}^2\text{]}$$

Możemy ustalić gatunek stali bez szczegółowych testów



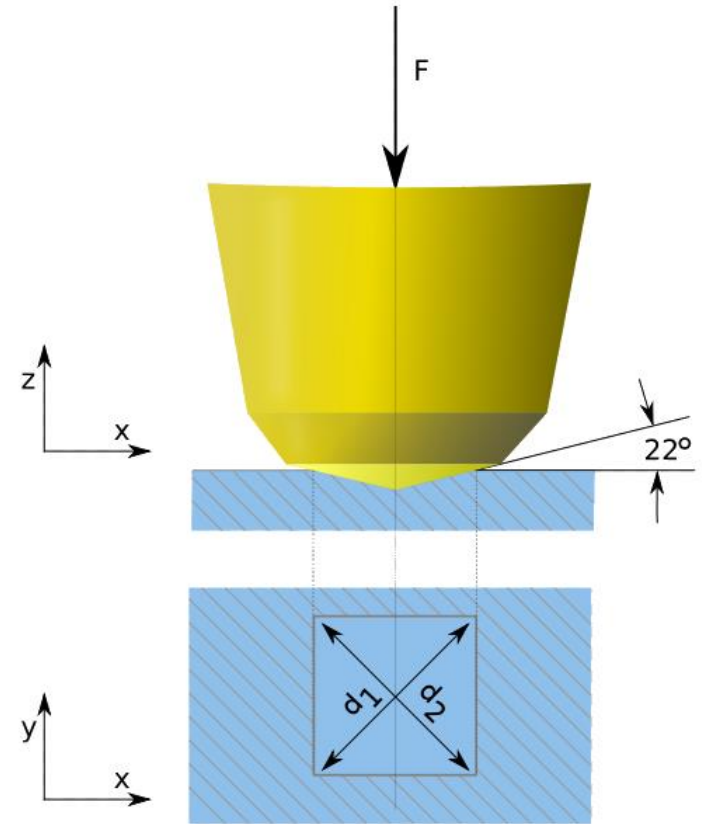
Rys: wikipedia

Vickers (EN ISO 6507)

$$HV = 0,189 P / d^2$$

$$d = (d_1 + d_2) / 2$$

$$R_m \approx 95,5 [\sqrt{ (149 + 0,122 HV) - 12,2 }]$$



Rys: wikipedia

Rockwell (EN ISO 6508)

$$HR = 100 - e / 0,002$$

e [mm] = wyłącznie deformacja plastyczna

Siła zależy od rodzaju materiału

HR może być przeliczona do R_m w sposób zależny od rodzaju materiału.

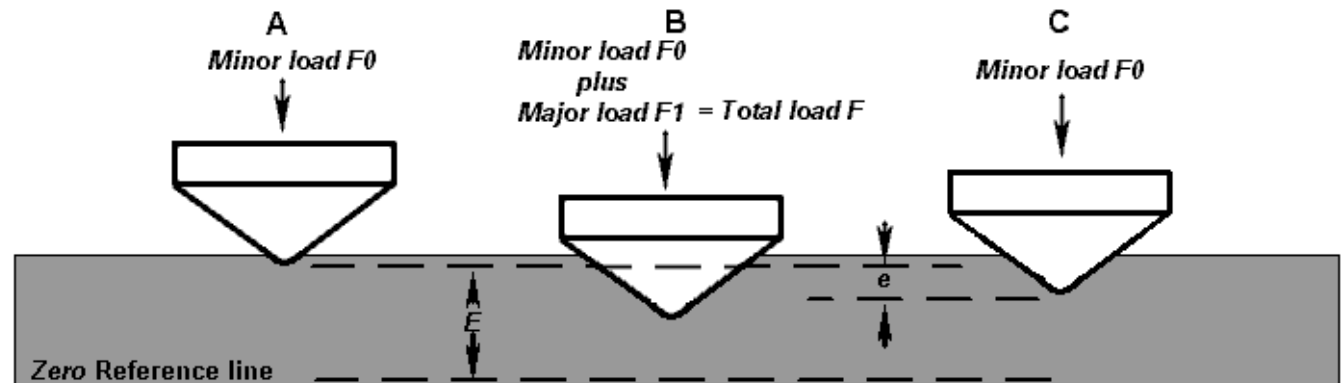


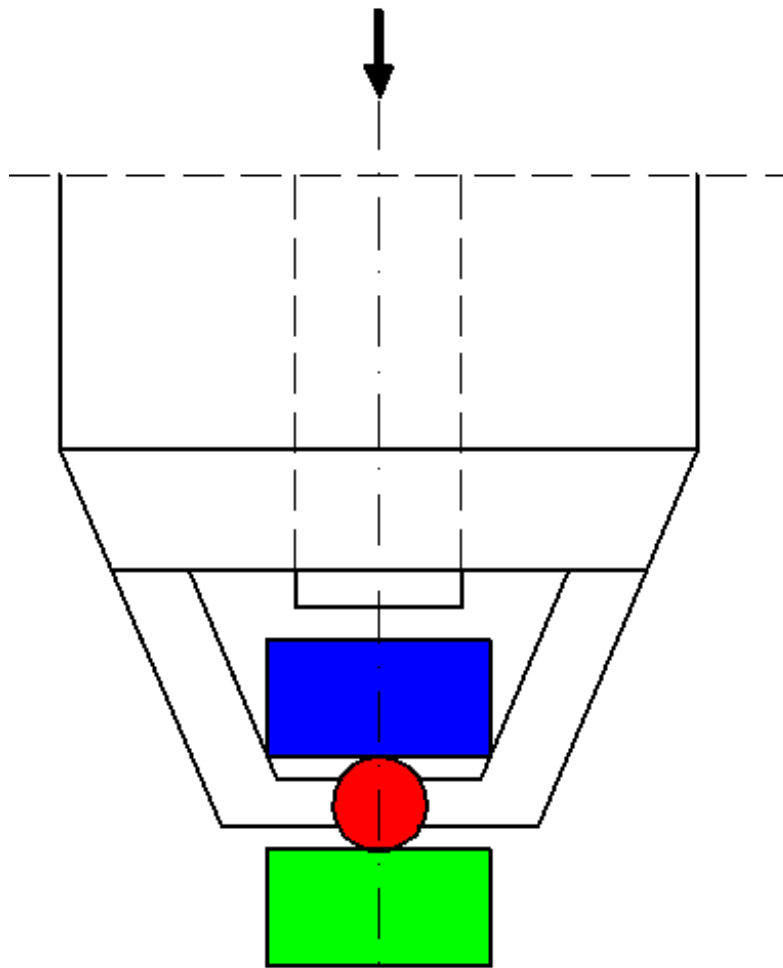
Fig. 1. Rockwell Principle

Rys: gobanengineeringnotes.com

Poldi
okrągły penetrator, obliczenia jak dla Brinella



Rys: metale24.pl



Rys: Autor

Próbka porównawcza

Penetrator

Badany materiał

Deformacje w próbce porównawczej i badanym materiale powstają pod wpływem tej samej siły.

$$HB = HB_p [D - \sqrt{(D^2 - d_p^2)}] / [D - \sqrt{(D^2 - d^2)}]$$

HB_p - HB twardość próbki porównawczej (znana)

D – średnica penetratora (znana)

d – otwór w badanym materiale (mierzony)

d_p – otwór w próbce porównawczej (mierzony)

$HB \rightarrow R_m \rightarrow$ gatunek stali

Nie musimy znać wartości siły

Bardzo stara konstrukcja, nie znamy gatunku stali, brak dokumentacji:



Rys: wikipedia



Rys: oceanmachinery.com

Wycięcie kilku fragmentów i przygotowanie z nich próbek do maszyny wytrzymałościowej: metoda bardzo dokładna, ale prowadząca do bezpowrotnego zniszczenia fragmentu konstrukcji



Rys: ndttechnik.com

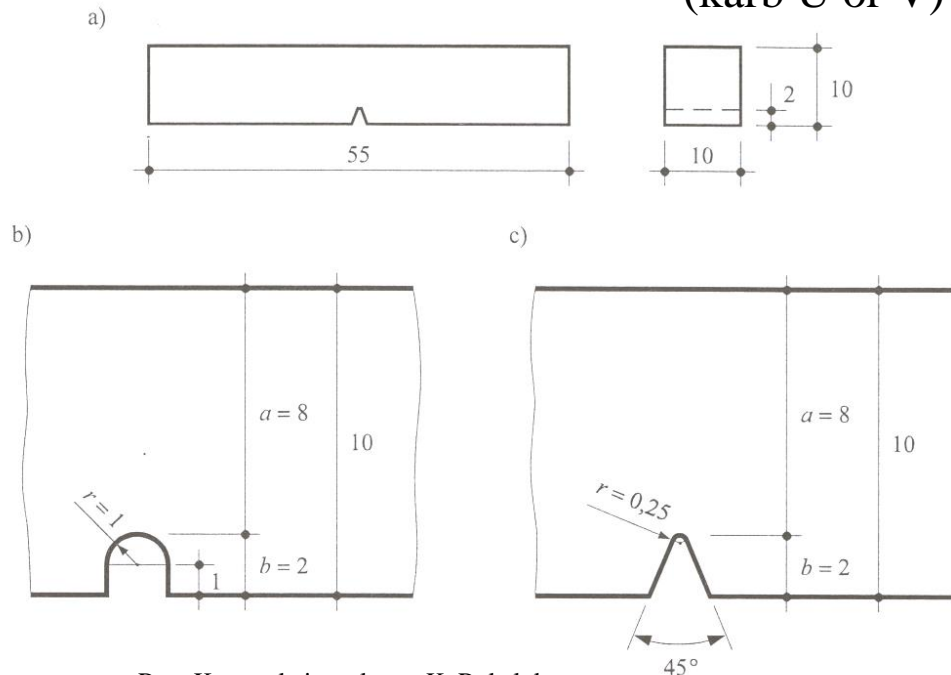
Badanie in situ młotkiem Poldiego: metoda przybliżona ale bezinwazyjna.

Udarność

odporność na obciążenia dynamiczne

- młot Charpy'ego

Kształt próbki
(karb U or V)



Rys: ccsi-inc.com

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

Energia młota w pozycji startowej: $G h$

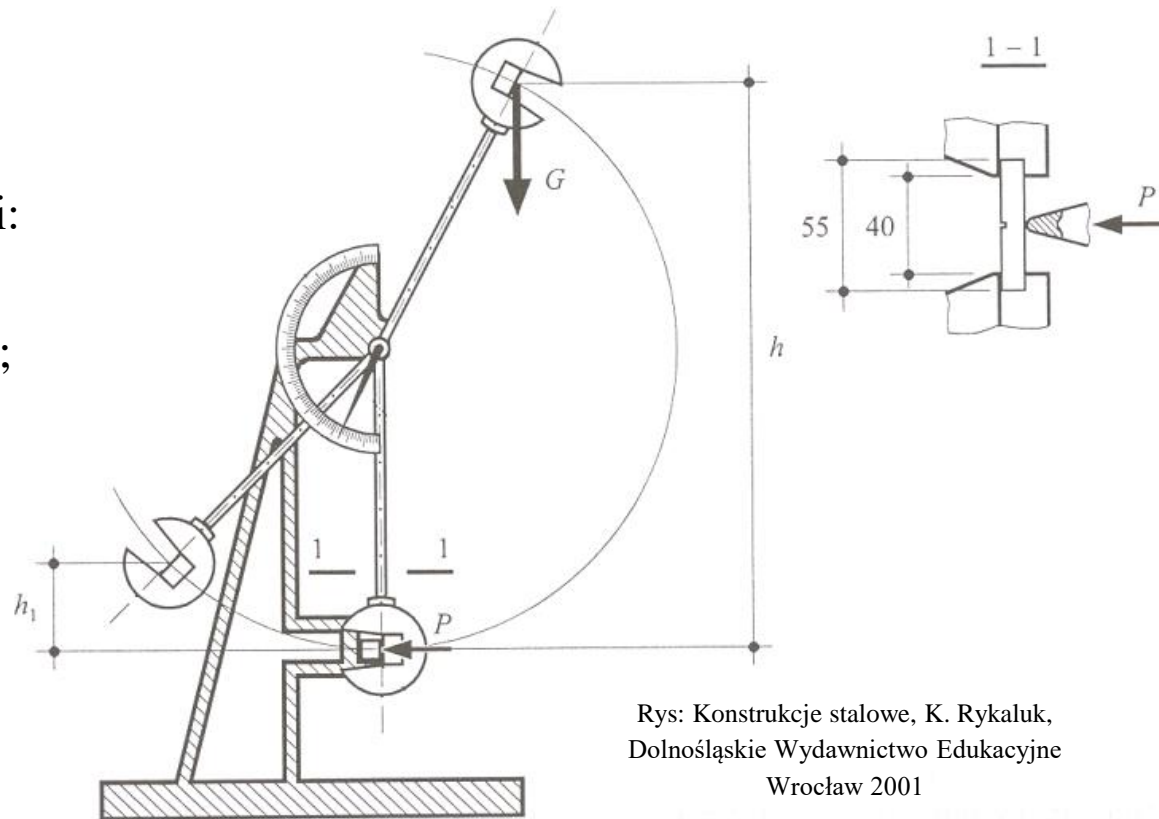
Energia młota w pozycji końcowej: $G h_1$

Energia zaabsorbowana przez materiał:

$$\text{KCU (KCV)} = G (h - h_1) \text{ [J]}$$

Dwie alternatywne miary udarności:

- energia [J];
- energia / przekrój próbki [J / cm^2];

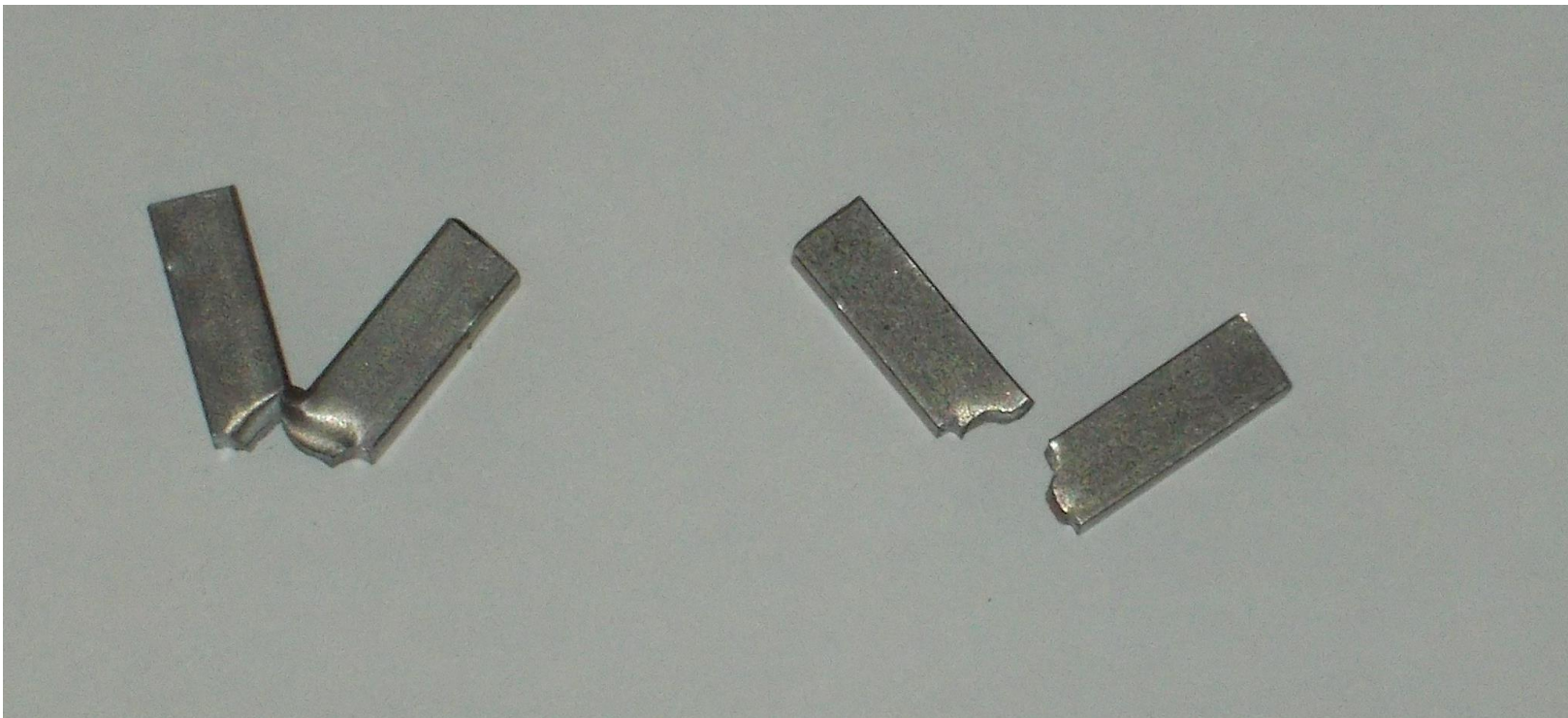


Rys: Konstrukcje stalowe, K. Rykaluk,
Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne
Wrocław 2001

Wynik testu:

1. złamanie bez rozdzielenia
2. złamanie z rozdzielaniem

$$KC(1) > KC(2)$$



Rys: Autor

Oznaczenia podgatunków stali

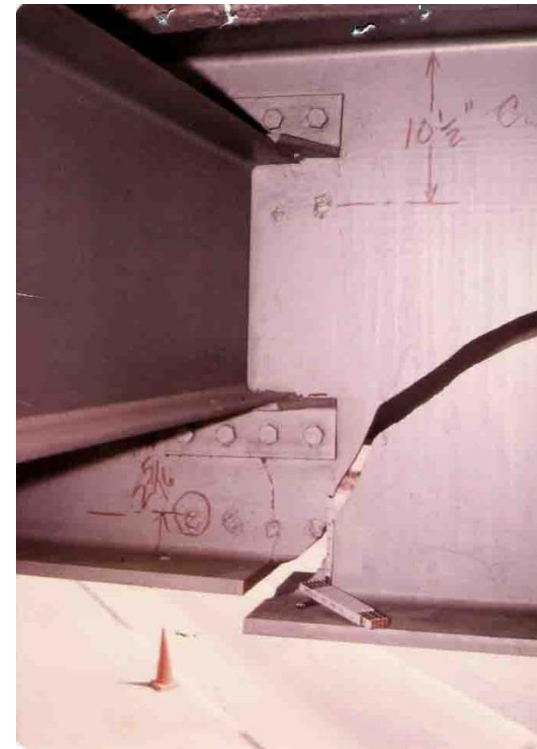
EN 10025-2 tab. 9

T [°C]	KV [J]		
	27	40	60
+20	JR	KR	LR
0	J0	K0	L0
-20	J2	K2	L2
-30	J3	K3	L3
-40	J4	K4	L4
-50	J5	K5	L5
-60	J6	K6	L6

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.



Rys: globalnpsolutions.com



Rys: wikipedia

Skłonność do kruchego pęknięcia rośnie gdy:

- ↓ temperatura;
- ↑ naprężenie;
- ↑ grubość elementu;

EN 1993-1-10 tab 2.1

Gatunek stali	Grupa jakości	Praca łamania Charpy CVN		Temperatura obliczeniowa							Temperatura obliczeniowa			
		w T [°C]	J _{min}	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

Ryzyko pęknięcia stali w niskich temperaturach → zbyt grube elementy są niedopuszczalne

Sprężystość

zdolność do odzyskania pierwotnego kształtu

f_y , E

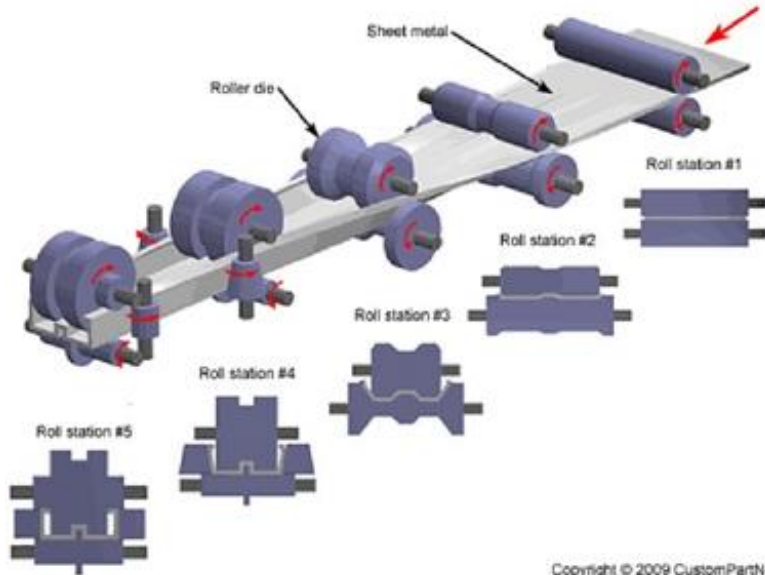
Duża wartość f_y = duża nośność. Duża wartość E oznacza małe odkształcenia konstrukcji i małą podatność na niestateczność.

Ciągliwość / plastyczność

zdolność do trwałych odkształceń

$$f_y$$

Cecha ważna w przypadku przekrojów zimnogiętych. Powstają w temperaturze pokojowej przez nadanie blachom trwałych (plastycznych) deformacji.



Rys: cnc.info.pl

Kowalność

możliwość kształtowania w podwyższonej temperaturze przez kucie lub prasowanie

Cecha ważna w przypadku przekrojów gorącowalcowanych. Są one kształtowane w wysokiej temperaturze w walcowni.

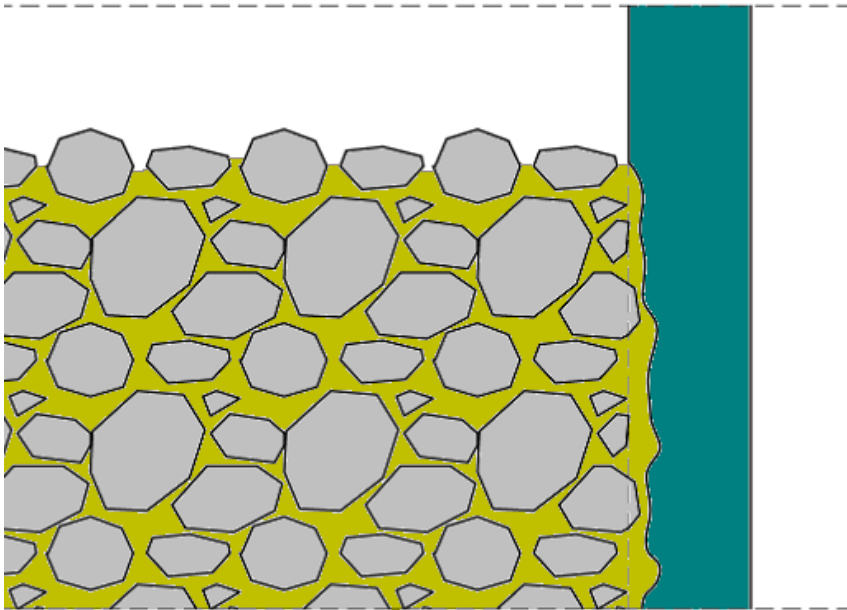


Rys: wd-bearing.com

Ścieralność

podatność na ścieranie

Ważna dla konstrukcji narażonych na ścieranie (np. wewnętrzne powierzchnie silosów).



Rys: mining-report.de

Rys: Autor

Wytrzymałość zmęczeniowa

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

To nie to samo co wytrzymałość materiału

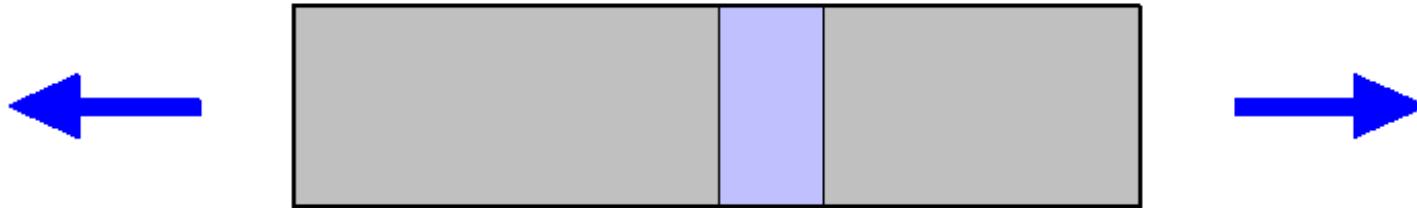
Wytrzymałość → obciążenia statyczne

Wytrzymałość zmęczeniowa → obciążenia cykliczne (dynamiczne)

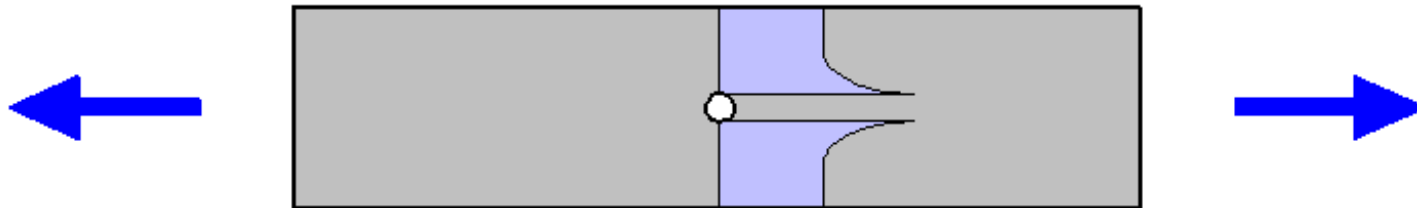
Cecha ważna w przypadku konstrukcji narażonych na obciążenia dynamiczne i cykliczne.

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

W każdym elemencie istnieją karby (otwory, spoiny, mikropęknięcia). Wokół nich dochodzi do koncentracji naprężeń.



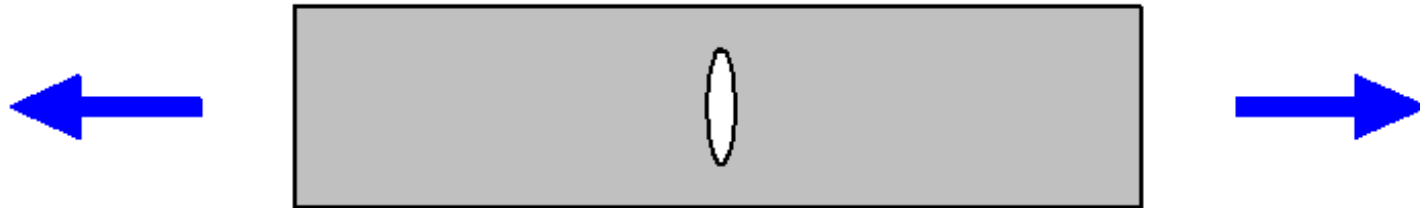
Rys: Autor



$$\mu \sigma_{Ed} \leq f_y$$

μ współczynnik koncentracji naprężeń
 σ_{Ed} naprężenie dla przekroju idealnego

W przypadku obciążeń cyklicznych dochodzi do rozrastania się imperfekcji aż do zniszczenia elementu.



Rys: Autor

Zależność ogólna:




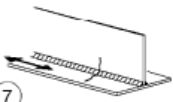
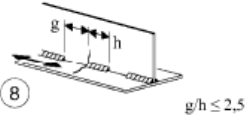
Wytrzymałość zmęczeniowa



Rys: wikipedia

Liczba cykli

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 krater. 4) Spoiny czołowe wykonywane automatycznie jednostronnie na ciągłej podkładce bez kraterów.	4) Gdy w złączu występują krater, 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) Przerwane podłużne spoiny pachwinowe.	8) Zakres $\Delta\sigma$ oblicza się na podstawie naprężeń normalnych w pasie.
		9) Podłużne spoiny czołowe, pachwinowe lub przerwane przy	9) Zakres $\Delta\sigma$ oblicza się na podstawie naprężeń normalnych

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 czolowa: $e_1 \geq 1,5 d$
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	

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

Kruchość

Pękanie pod obciążeniem

Ważne dla kilku innych właściwości:

kruchość \uparrow \rightarrow udarność \downarrow oraz kowalność \downarrow oraz spawalność \downarrow

Skład chemiczny

Stal:

Fe \approx 98%

Domieszki \approx 2%

Aluminium:

Al \approx 85,0% - 98,5%

Domieszki \approx 1,5% - 15,0%

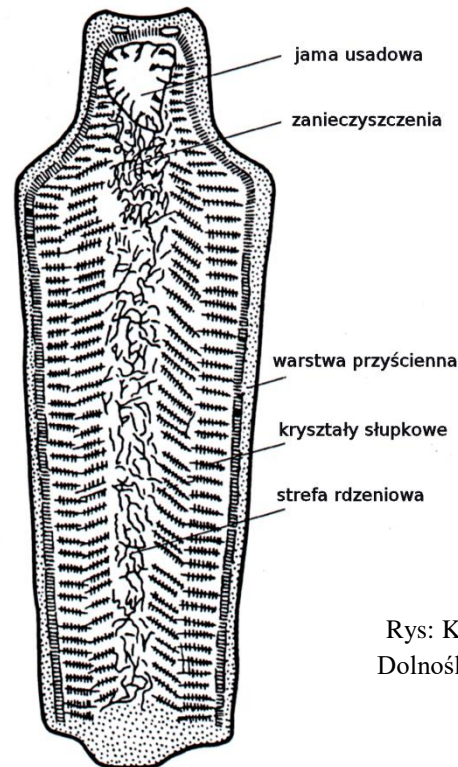
Pierwiastek		Stal	Aluminium
Tlen O	☠	Korozja, redukcja C, S, P	Korozja
Wodór H	☠	Kruchość, pękanie	Kruchość, pękanie
Azot N	☠	Kruchość, pękanie	Kruchość, pękanie
Siarka S	☠	Kruchość, pękanie	
Fosfor P	☠	Kruchość, pękanie	
Żelazo Fe	👍	Główny składnik	
Aluminium Al	👍	Redukcja O	Główny składnik
Węgiel C	👍	Twardość 👍 wytrzymałość 👍 udarność 📉 spawalność 📉	
Chrom Cr	👍	Twardość 👍 wytrzymałość 👍 ścieralność 👍 spawalność 📉	
Miedź Cu	👍	Nierdzewność 👍	Drugi składnik stopowy
Magnez Mg	👍		Drugi składnik stopowy
Mangan Mn	👍	Redukcja O, S	Drugi składnik stopowy
Molibden Mo	👍	Nośność 👍 spawalność 📉	Drugi składnik stopowy
Nikiel Ni	👍	Twardość 👍 wytrzymałość 👍 udarność 👍	
Niob Nb	👍	Spawalność 👍	
Krzem Si	👍	Redukcja O twardość 👍 wytrzymałość 👍	Drugi składnik stopowy
Tytan Ti	👍	Wytrzymałość 👍	
Wanad V	👍	Wytrzymałość 👍 udarność 👍 spawalność 📉	
Cynk Zn	👍		Drugi składnik stopowy

Przykład składu chemicznego kilku gatunków stali (**najczęściej stosowane**):

Stal	C [%]			Si _{max} [%]	Mn _{max} [%]	P _{max} [%]	S _{max} [%]	N _{max} [%]	Cu _{max} [%]
	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

Wnioski:

- S235 → S275 → S355: wzrost wytrzymałości ↔ wzrost zawartości C, Si, Mn
- JR → J0 → J2: wzrost wytrzymałości w niskich temperaturach ($\#t / 67 - 73$) ↔ spadek zawartości zanieczyszczeń P, S, N

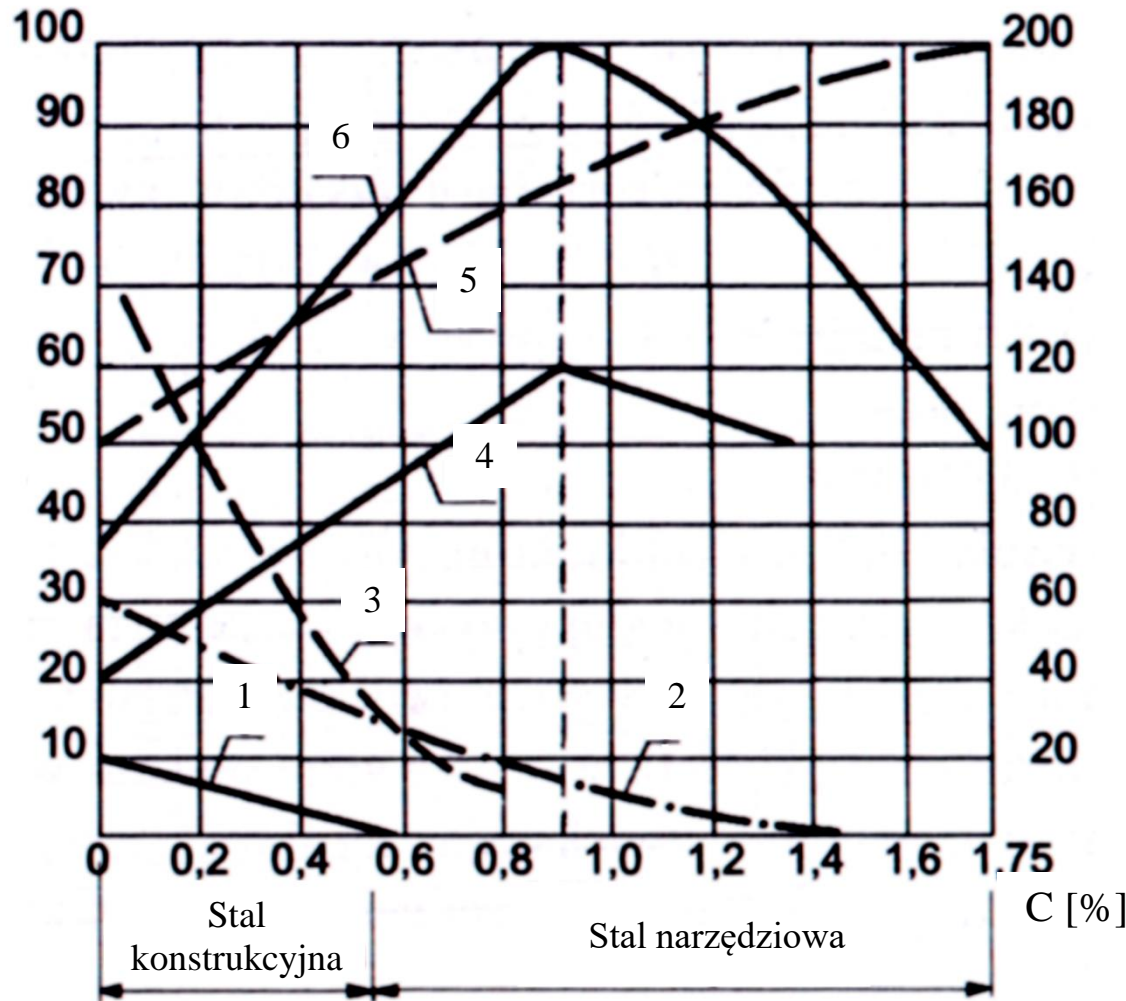


Rys: Konstrukcje stalowe, K. Rykaluk,
Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne
Wrocław 2001

Parametry mechaniczne ↔ zawartość C [%]

1, 2, 3, 4, 6

5



1. Udarność / 100 (lewa skala, [kJ / m²]);

2. Wydłużenie, #t / 12 (lewa skala, [%]);

3. Przewężenie, #t / 18 (lewa skala, [%]);

4. $f_y / 10$ (lewa skala, [MPa]);

5. Twardość Brinella (prawa skala, [MPa]);

6. $f_u / 10$ (lewa skala, [MPa]);

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

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 $\rightarrow f_y = 235$ [MPa]

D:

Dodatkowe informacje; dla stali
konstrukcyjnej parametry obróbki
w procesie stalowniczym

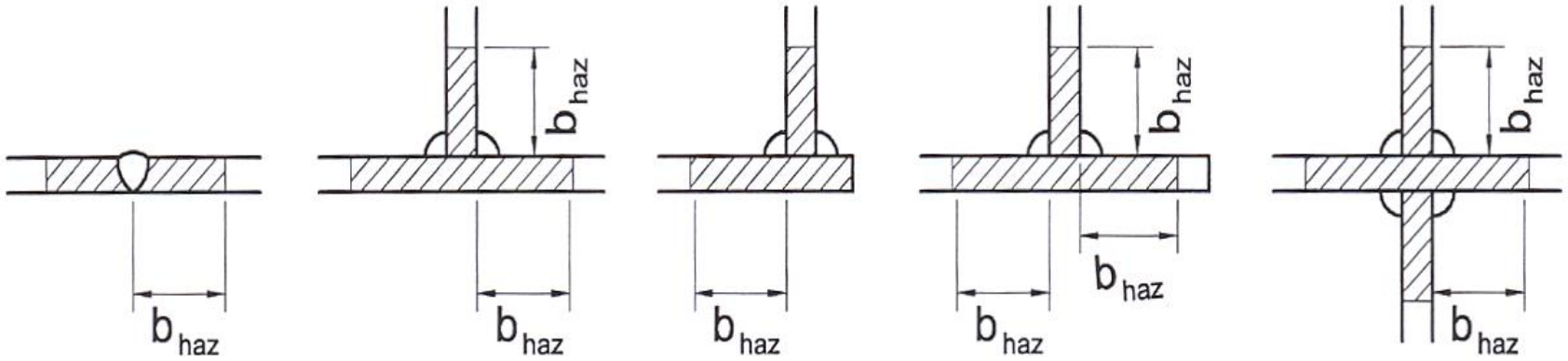
Przykład:

S 235 JR G2

Stopy aluminium

- 1xxx Aluminium techniczne, Al > 99 %
- 2xxx Stopy Al + Cu
- 3xxx Stopy Al + Mn
- 4xxx Stopy Al + Si
- 5xxx Stopy Al + Mg
- 6xxx Stopy Al + Mg + Si
- 7xxx Stopy Al + Zn
- 8xxx Stopy Al + other
- 9xxx Stopy specjalne (nieużywane)

Dla konstrukcji aluminiowych spawanych bardzo ważny jest obszar wpływu ciepła podczas spawania (HAZ = heat affected zones). W obszarze tym dochodzi do znacznego spadku właściwości mechanicznych aluminium (wytrzymałości).



Rys: Autor

Współczynnik redukujący

$$1,0 \geq \rho_{\text{haz}} \geq 0,50$$

Nośność przekroju jest definiowana jako wytrzymałość stali pomnożona przez odpowiednią charakterystykę geometryczną:

$$R = X \cdot f$$

W przypadku spawania aluminium dochodzi do lokalnego spadku wytrzymałości stopu:

$$f_1 = f \cdot \rho$$

Definiuje to nową nośność przekroju:

$$R_1 = X \cdot f_1$$

Jednak prowadzenie obliczeń będzie prostsze, gdy przyjmie się stałą wartość wytrzymałości i zmieni jedynie geometrię przekroju:

$$R_1 = X \cdot (f \cdot \rho) = (X \cdot \rho) \cdot f$$

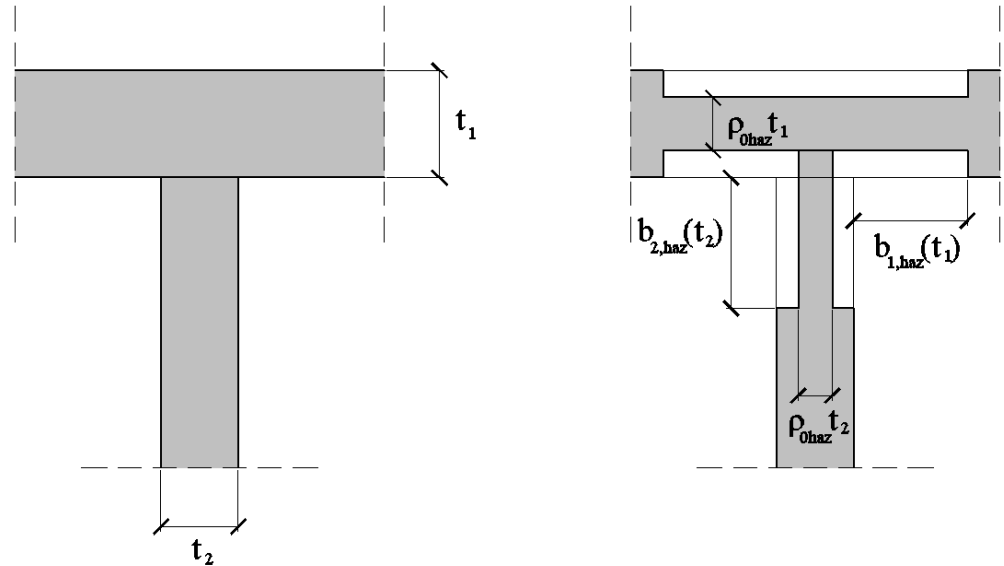
Ustalenie efektywnego przekroju polega na lokalnej zmianie grubości

$$t_{\text{eff}} = t_0 \rho$$

Wartość parametru ρ jest zdefiniowana w EN 1999-1-1 tab. 3.2, w zależności od rodzaju stopu aluminium. Zasięg zmiany grubości definiuje EN 1999-1-1 6.1.6.3 w zależności od grubości przekroju.

Stop EN-AW	Odmiana ¹⁾	Grubość mm ¹⁾	f_0 ¹⁾	f_u	A_{508} ¹⁾⁽²⁾	$f_{0,haz}$ ²⁾	$f_{u,haz}$ ²⁾	Współczynniki redukcyjne ²⁾		BC ⁴⁾	n_p ^{1), 5)}
			N/mm ²		%	N/mm ²		$\rho_{0,haz}$ ¹⁾	$\rho_{u,haz}$		
3004	H14 H24/H34	≤ 6 3	180 170	220	1 3	75	155	0,42 0,44	0,70	B	23 18
	H16 H26/H36	≤ 4 3	200 190	240	1 3			0,38 0,39	0,65		25 20
3005	H14 H24	≤ 6 3	150 130	170	1 4	56	115	0,37 0,43	0,68	B	38 18
	H16 H26	≤ 4 3	175 160	195	1 3			0,32 0,35	0,59		43 24
3103	H14 H24	≤ 25 12,5	120 110	140	2 4	44	90	0,37 0,40	0,64	B	31 20
	H16 H26	≤ 4	145 135	160	1 2			0,30 0,33	0,56		48 28

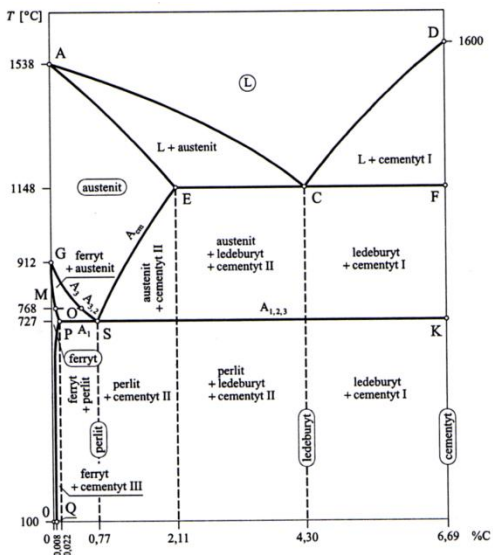
- $0 < t \leq 6 \text{ mm}$ $b_{haz} = 20 \text{ mm}$
- $6 < t \leq 12 \text{ mm}$ $b_{haz} = 30 \text{ mm}$
- $12 < t \leq 25 \text{ mm}$ $b_{haz} = 35 \text{ mm}$
- $25 \text{ mm} < t$ $b_{haz} = 40 \text{ mm}$



Rys: Autor

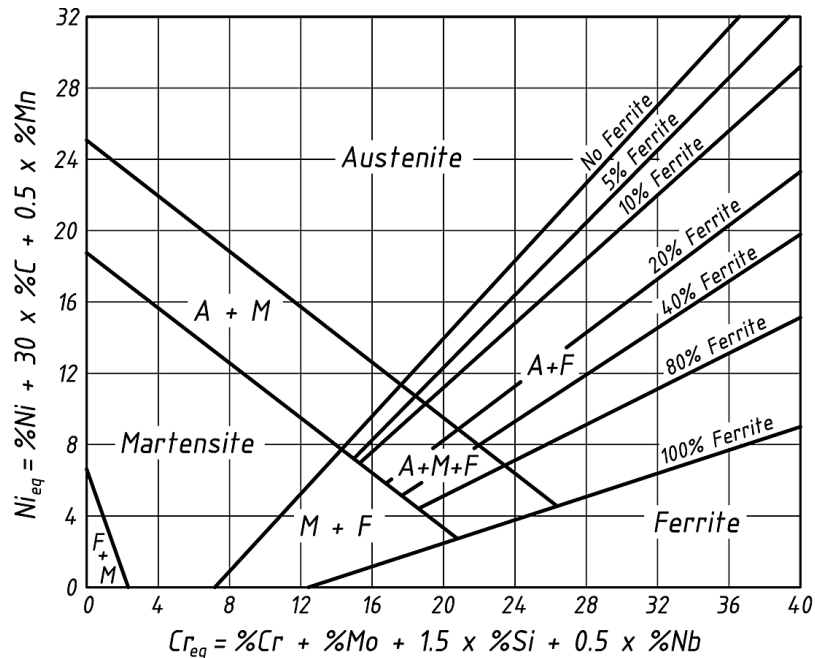
Zmiany struktury wewnętrznej

Zgodnie z informacjami pokazanymi na wykładzie #1, austenit jest substancją nietrwałą, istniejącą tylko w temperaturze $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$. W rzeczywistości jest to prawda tylko dla „czystego” układu fazowego Fe-C. Dodanie domieszek stopowych zmienia ten obraz i sprawia, że austenit staje się substancją trwałą w temperaturze pokojowej.



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

Dla rozpatrzenia balansu równowagi układów Fe-C, konieczne staje się wyznaczenie równoważników niklu i chromu.

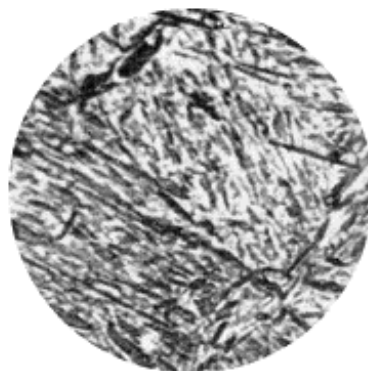


Rys: I. Tylek, K. Kuchta, Physical and technological properties of structural stainless steel, Technical Transactions 4-B / 2014

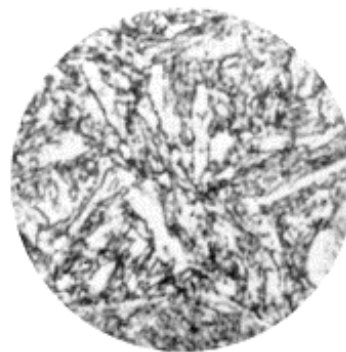


Podobnie na wykładzie #1 padła informacja, że martenzyt jest zbyt kruchy, by był użyteczny jako materiał konstrukcyjny. Jednakże umiejętne zastosowanie ulepszenia cieplnego zmienia wewnętrzną strukturę krystaliczną martenzytu, znacznie ograniczając jego kruchość. Dzięki temu możliwe jest używanie stali martenzytowej.

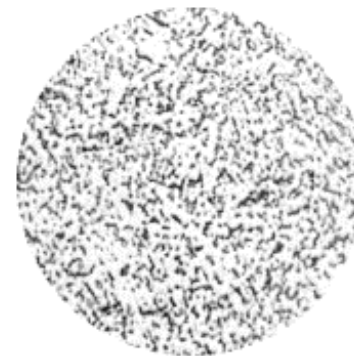
Rys: homemetalshopclub.org



Martenzyt

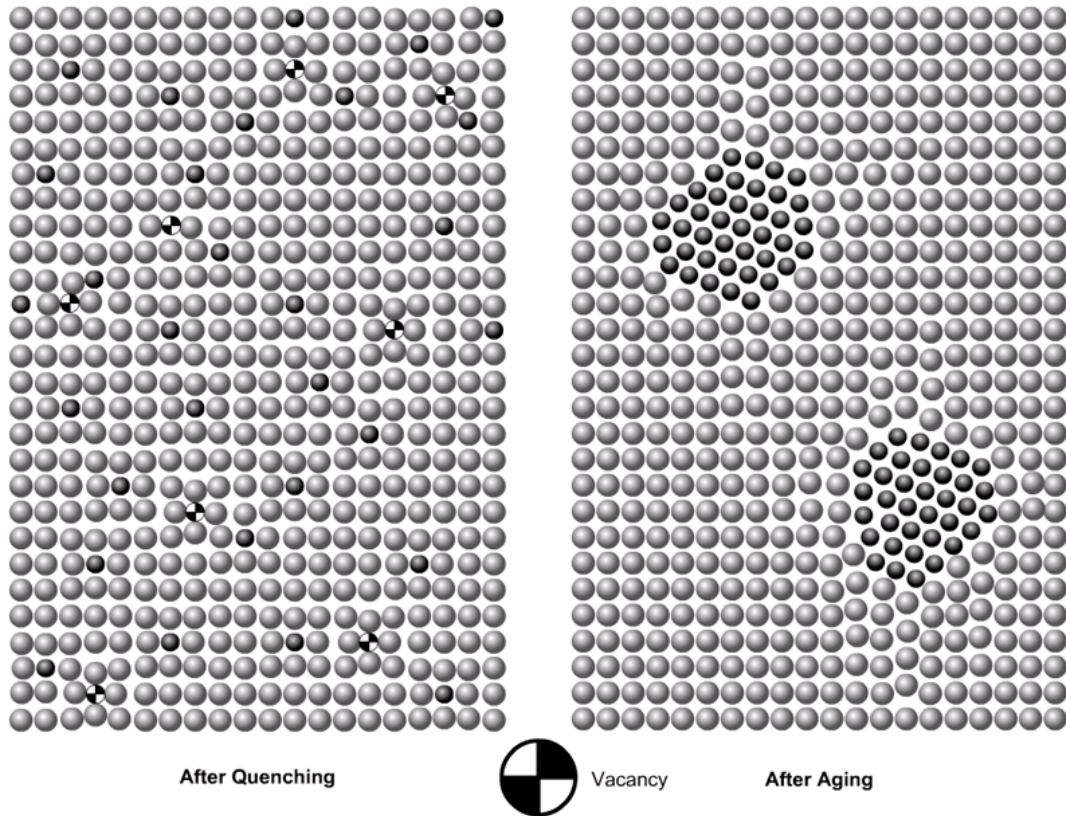


Odpuszczanie niskie



Odpuszczanie wysokie

Rys: gowelding.com



Rys: spaceflight.esa.int

W przypadku aluminium stosuje się obróbkę cieplną zwaną starzeniem. Jej efektem jest odpowiednie zlokalizowanie atomów domieszek stopowych. Ograniczają one deformacje i ścinanie kryształów aluminium, podnosząc jego parametry wytrzymałościowe.

Odległa analogia – zbrojenie strefy rozciąganej betonu ogranicza deformacje i podnosi nośność przekroju zbrojonego.



Rys: phys.org

Zagadnienia egzaminacyjne

Wykres σ – ϵ , wartości E , R_e , R_m , f_k , f_y

Znaczenie badania twardości

Znaczenie badania Charpy’ego

Znaczenie spawalności

Wpływ spawania na aluminium

Dziękuję za uwagę

© 2025 dr inż. Tomasz Michałowski

tmichal@pk.edu.pl