

12. WŁASNOŚCI MECHANICZNE MATERIAŁÓW

Opracował: prof. dr hab. inż. Jerzy Pacyna

12.1. Wprowadzenie

Projektując nowy materiał lub dobierając z katalogu materiał już istniejący o określonym składzie chemicznym i strukturze, oczekujemy osiągnięcia przez ten materiał określonych własności, najczęściej mechanicznych.

Własności mechaniczne określane są w następujących warunkach działania obciążeń:

- statycznych (wzrastających wolno),
- dynamicznych (wzrastających nagle),
- długotrwałych (najczęściej przy równoczesnym działaniu podwyższonej temperatury w różnych środowiskach),
- zmiennych (zmęczeniowych).

Temperatura badania własności mechanicznych może być równa temperaturze otoczenia, może być również obniżona lub podwyższona.

12.2. Podstawowe wskaźniki własności mechanicznych

Wyznaczone własności mechaniczne materiałów w większości nie są stałymi materiałowymi (zależnymi tylko od temperatury) lecz wskaźnikami, uzależnionymi m.in. od wymiarów i kształtu próbek. Dlatego, podając ich wartość należy zawsze określić wymiary próbki i warunki w jakich zostały określone, jeżeli nie wynika to z zapisu symbolu danego wskaźnika.

W warunkach obciążeń statycznych wykonuje się m. in.:

- próbę rozciągania (wg PN-EN 10002-1+AC1) dla oceny m.in.:

- R_m – wytrzymałości na rozciąganie,
- R_{eH} – górnej granicy plastyczności,
- R_{eL} – dolnej granicy plastyczności,
- $R_{p0,2}$ - umownej granicy plastyczności,
- A – wydłużenia procentowanego zmierzonego po zerwaniu,
- Z – przewężenia procentowego zmierzonego po zerwaniu;

- próbę ściskania (wg PN-57/H-04320) dla oceny m. in.:

- R_c – wytrzymałości na ściskanie,
- $R_{c0,01}$ – umownej granicy sprężystości,
- R_{plc} – wyraźnej granicy plastyczności,
- $R_{c0,2}$ – umownej granicy plastyczności,
- a_c – skrócenia względnego;

- próbę zginania (nieznormalizowaną) dla oceny m.in.:

- R_g – wytrzymałości na zginanie,
- $R_{g0,2}$ – umownej granicy plastyczności przy zginaniu,
- $f_{g0,2}$ – strzałki ugięcia odpowiadającej wydłużeniu względnemu skrajnego włókna o $\varepsilon = 0,2\%$;

- próbę odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia (wg RPr PN-EN ISO 12737) dla oceny:

- K_{Ic} - współczynnika intensywności naprężeń;

- pomiary twardości:

- sposobem Brinella (wg PN-EN ISO 6506-1),
- sposobem Vickersa (wg PN-EN ISO 6507-1),

- sposobem Rockwella (wg PN–EN ISO 6508-1).

W warunkach obciążeń dynamicznych wykonuje się m. in.:

- próbę uderności sposobem Charpy'ego (wg PN–EN 10045–1) dla oceny:
KU, KV - pracy złamania próbek z karbem w kształcie litery U lub V,
KCU, KCV – uderności próbek z karbem w kształcie litery U lub V;
- pomiar twardości sposobem Shore'a (nieznormalizowany)
- pomiar twardości sposobem Leeba przyrządem typu Equotip (nieznormalizowany)

W warunkach obciążeń długotrwałych wykonuje się m. in.:

- próbę pełzania (wg PN–76/H–04330) dla oceny m.in.:
R_{x/t/r} - granicy pełzania,
R_{z/t/r} - wytrzymałości na pełzanie,
A_{p/t/r} – wydłużenia po zerwaniu,
Z_{u/T} – przewężenia w miejscu rozerwania próbki;
- badania korozji naprężeniowej (wg PN–EN ISO 7539–6) dla oceny:
K_{ISCC} - współczynnika intensywności naprężeń w warunkach korozyjnych.

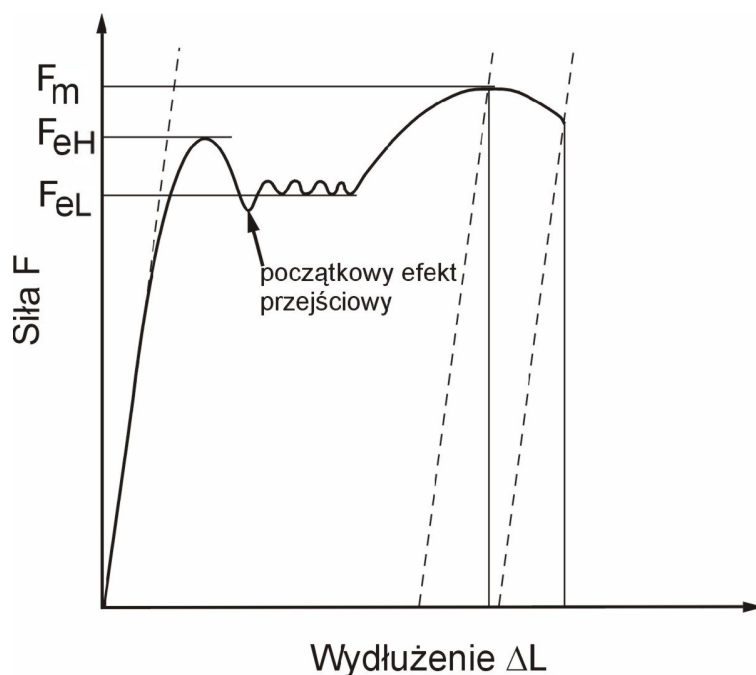
W warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych (zmęczeniowych) wykonuje się m. in.:

- zmęczeniową próbę rozciągania-ściskania (wg PN–74/H–04327 oraz PN–76/H–04325) dla oceny m. in.:
Z_r – wytrzymałości na zmęczenie przy rozciąganiu,
Z_c – wytrzymałości na zmęczenie przy ściskaniu,
Z_{ry} – wytrzymałość na zmęczenie przy odzerowo tętniącym rozciąganiu,
Z_{rc} – wytrzymałość na zmęczenie przy wahadłowym rozciąganiu-ściskaniu;
- zmęczeniową próbę zginania obrotowego na próbkach okrągłych (wg PN–76/H–04326 oraz PN–76/H–04325) dla oceny:
Z_{go} – wytrzymałości na zmęczenie przy zginaniu obrotowym;
- zmęczeniową próbę zginania płaskiego (wg PN–76/H–04326 oraz PN–76/H–04325) dla oceny m. in.:
Z_{gw} – wytrzymałości na zmęczenie przy zginaniu wahadłowym,
Z_{gj} – wytrzymałości na zmęczenie przy zginaniu odzerowotętnającym (jednostronnym),
Z_g – wytrzymałości na zmęczenie przy dowolnym kształcie cyklu zginania ale przy określonym współczynniku asymetrii cyklu $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$.

12.3. Własności mechaniczne materiałów określane w warunkach obciążeń statycznych

12.3.1. Próba rozciągania (wg PN–EN 10002–1+AC1)

Próba polega na rozciąganiu próbki, na ogół aż do zerwania, zarejestrowaniu zależności użytej siły od wydłużenia próbki (**rys. 12.1**) i wyznaczeniu jednej lub więcej własności mechanicznych przy temperaturze otoczenia (10÷35°C), z których najważniejsze to wskaźniki wytrzymałości i plastyczności.



Rys. 12.1. Zależność siły od wydłużenia dla materiału wykazującego wyraźną granicę plastyczności

12.3.1.1. Wskaźniki wytrzymałości (naprężenia)

Wskaźniki wytrzymałości są ilorazem siły w określonej chwili badania i początkowej powierzchni przekroju poprzecznego (S_o) próbki. Zaliczamy do nich:

1. Wytrzymałość na rozciąganie R_m – jest to naprężenie odpowiadające największej sile F_m (por. rys. 12.1).

$$R_m = \frac{F_m}{S_o} [\text{N/mm}^2]^1 \quad (12.1)$$

2. Wyrażna granica plastyczności R_e – jest to naprężenie, powodujące przyrost odkształcenia plastycznego bez wzrostu siły.
 - 2.1. Górna granica plastyczności R_{eH} – jest to największe naprężenie w zakresie występowania wyraźnej granicy plastyczności (por. rys.12.1)

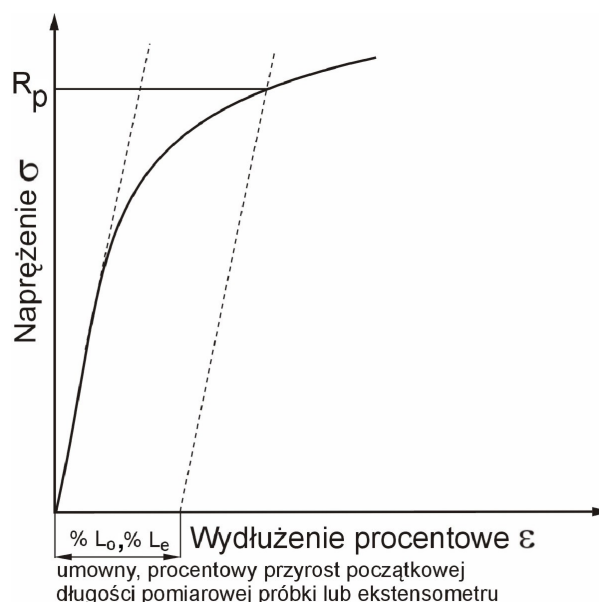
$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_o} [\text{N/mm}^2] \quad (12.2)$$

- 2.2. Dolna granica plastyczności – jest to najmniejsze naprężenie w zakresie występowania wyraźnej granicy plastyczności, z pominięciem (ewentualnego) początkowego efektu przejściowego (por. rys.12.1).

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_o} [\text{N/mm}^2] \quad (12.3)$$

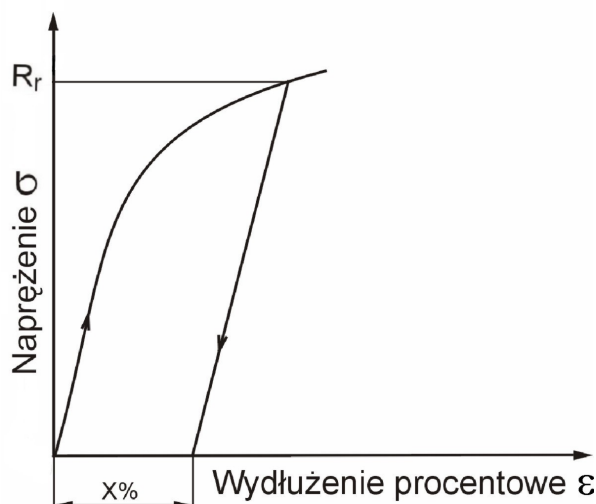
3. Umowna granica plastyczności R_p nazywana w normie naprężeniem granicznym przy przyroście nieproporcjonalnym – jest to naprężenie, określone podczas trwania próby, powodujące nieproporcjonalny przyrost wydłużenia równy umownemu procentowi początkowej długości pomiarowej próbki L_o lub ekstensometru L_e (rys. 12.2). Symbol tej wielkości uzupełnia się wskaźnikiem określającym umowny procent przyrostu początkowej długości pomiarowej próbki lub ekstensometru, np. $R_{p0,2}$.

¹ 1N/mm²=1MPa



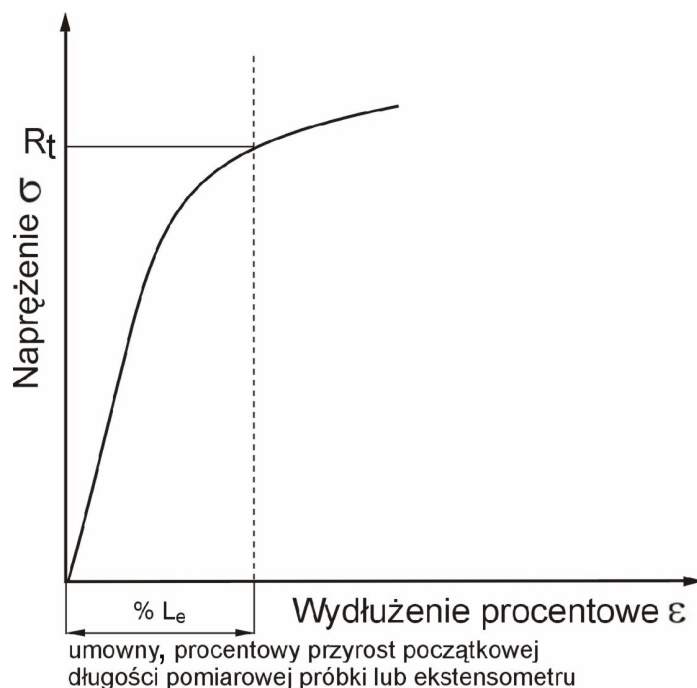
Rys. 12.2. Umowna granica plastyczności R_p (naprężenie graniczne przy przyroście nieproporcjonalnym)

4. Naprężenie graniczne R_r przy wydłużeniu trwałym – jest to naprężenie, przy którym po zdjęciu siły (rys. 12.3), wydłużenie trwałe początkowej długości pomiarowej próbki L_0 lub przyrost trwały długości pomiarowej ekstensometru L_e jest równy umownej wartości. Symbol wielkości uzupełnia się wskaźnikiem określającym umowny procent trwałego wydłużenia lub przyrostu, np. $R_{r0,2}$.



Rys. 12.3. Naprężenie graniczne R_r przy wydłużeniu trwałym

5. Naprężenie graniczne R_t przy przyroście całkowitym – jest to naprężenie określone podczas trwania próby, przy całkowitym przyroście wydłużenia (sprężystym i trwałym) równym umownemu procentowi początkowej długości pomiarowej próbki L_0 lub ekstensometru L_e (rys. 12.4). Symbol wielkości uzupełnia się wskaźnikiem, określającym umowny procent przyrostu początkowej długości pomiarowej próbki lub ekstensometru, np. $R_{t0,5}$.



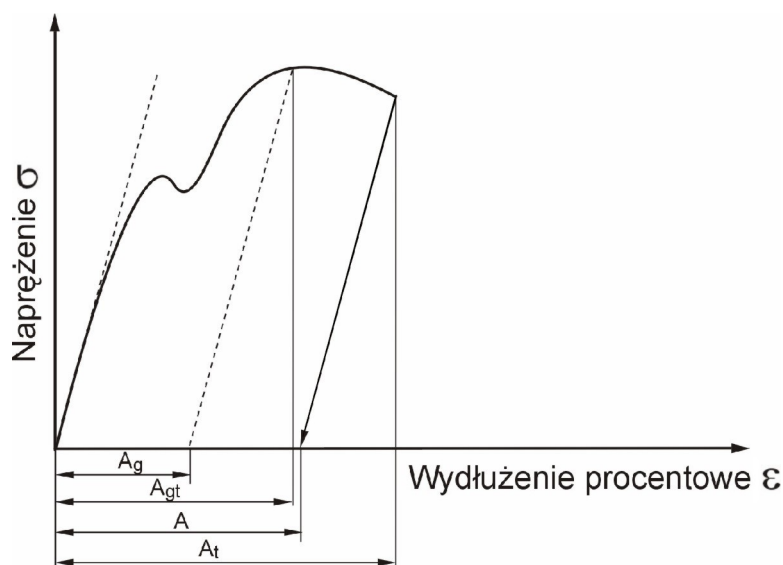
Rys. 12.4. Napężenie graniczne R_t przy przyroście całkowitym

12.3.1.2. Wskaźniki plastyczności (wydłużenie i przewężenie)

Wskaźniki plastyczności obliczane są na podstawie zmiany wymiarów próbki podczas próby, po jej odciążeniu lub po rozerwaniu. Zaliczamy do nich:

1. Wydłużenie procentowe po zerwaniu A – jest to trwałe wydłużenie długości pomiarowej zmierzone po zerwaniu ($L_u - L_o$), wyrażone w procentach początkowej długości pomiarowej (L_o) (rys. 12.5)

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \cdot 100 [\%] \quad (12.4)$$



Rys. 12.5. Określenie wydłużeń

Uwaga: Rozróżniamy próbki proporcjonalne i nieproporcjonalne. Próbki proporcjonalne to takie, których początkowa długość pomiarowa L_o jest równa $5 \cdot d$ lub $10 \cdot d$,

gdzie: d – średnica próbki na długości roboczej (pomiarowej).

Ponieważ początkowa powierzchnia przekroju poprzecznego w części roboczej próbki S_o jest równa:

$$S_o = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \Rightarrow d = 2\sqrt{\frac{S_o}{\pi}} \approx 1,13\sqrt{S_o} \quad (12.5)$$

dla próbki pięciokrotnej

$$L_o = 5 \cdot d = 5 \cdot 1,13\sqrt{S_o} = 5,65\sqrt{S_o} \quad (12.6)$$

W przypadku próbki płaskiej o przekroju prostokątnym $S_o = a \cdot b$,

gdzie: a – grubość,

b – szerokość części roboczej próbki płaskiej

Współczynnik 5,65 został przyjęty jako wartość międzynarodowa i dlatego wydłużenie procentowe po zerwaniu ocenione na próbce pięciokrotnej jest oznaczone literą A bez żadnego indeksu.

Jeżeli obliczona, początkowa długość pomiarowa L_o przy zastosowaniu współczynnika 5,65 jest mniejsza niż 20 mm, zaleca się stosowanie próbki dziesięciokrotnej lub nieproporcjonalnej.

Dla próbki dziesięciokrotnej

$$L_o = 10 \cdot d = 10 \cdot 1,13\sqrt{S_o} = 11,3\sqrt{S_o} \quad (12.7)$$

Wydłużenie procentowe po zerwaniu A ocenione na próbce dziesięciokrotnej jest oznaczone dodatkowo indeksem 11,3 – tzn. $A_{11,3}$.

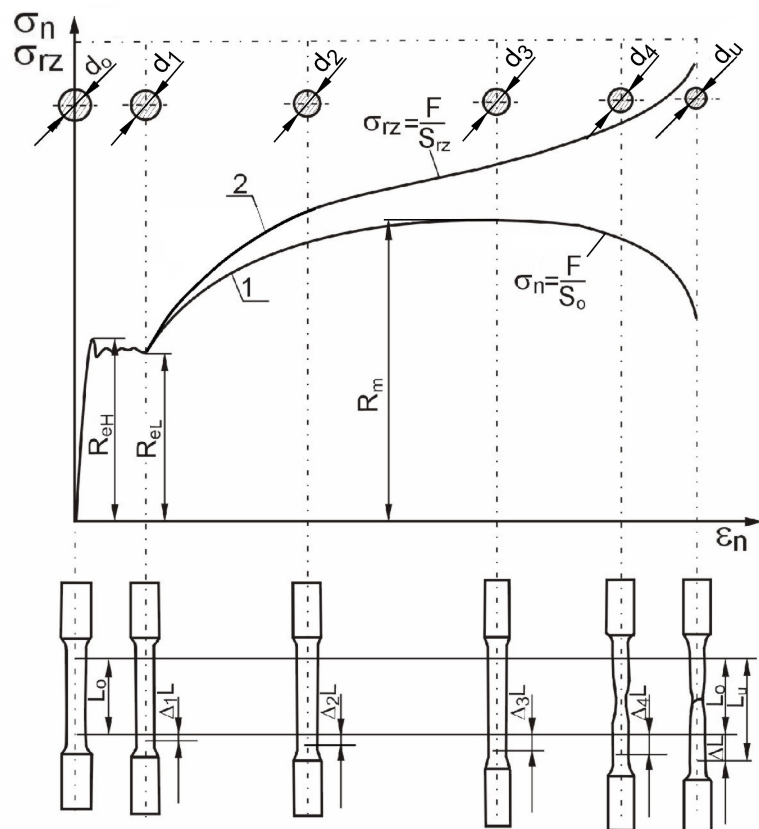
W przypadku próbek nieproporcjonalnych (tzn. innych niż pięcio– lub dziesięciokrotne) oznaczenie A należy uzupełnić indeksem, który jest początkową długością pomiarową, wyrażoną w milimetrach, np. A_{80mm} . Oznacza to, że wydłużenie procentowe zostało określone na próbce o początkowej długości pomiarowej (L_o) równej 80 mm.

2. Wydłużenie całkowite procentowe A_t przy rozerwaniu – jest to wydłużenie całkowite (sprężyste i plastyczne) długości pomiarowej podczas trwania próby w momencie rozerwania, wyrażone w procentach początkowej długości pomiarowej L_o (rys. 12.5).
3. Wydłużenie całkowite procentowe A_{gt} przy największej sile – jest to wydłużenie całkowite (sprężyste i plastyczne) długości pomiarowej podczas trwania próby przy największej sile, wyrażone w procentach początkowej długości pomiarowej L_o (rys. 12.5).
4. Wydłużenie nieproporcjonalne procentowe A_g przy największej sile – jest to wydłużenie trwałe (plastyczne) długości pomiarowej podczas trwania próby przy największej sile, wyrażone w procentach długości pomiarowej L_o (rys. 12.5).
5. Przewężenie procentowe Z – jest to największa zmiana powierzchni początkowego przekroju poprzecznego, którą stwierdzono po rozerwaniu ($S_o - S_u$), wyrażona w procentach początkowej powierzchni przekroju poprzecznego S_o

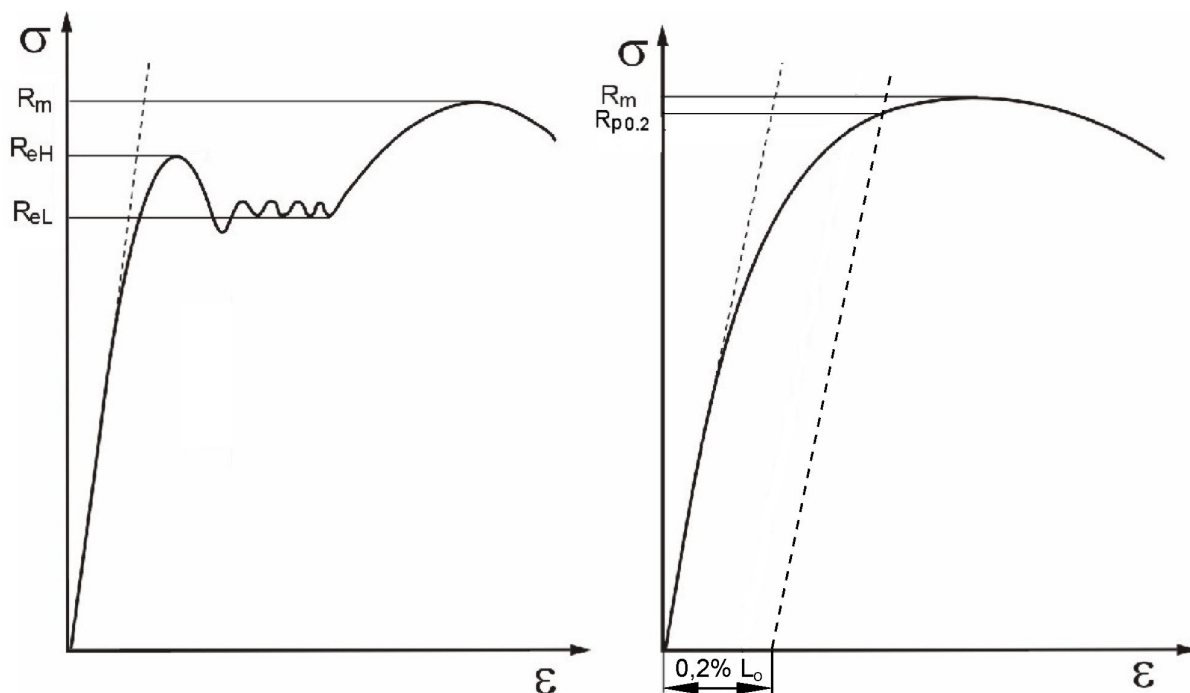
$$Z = \frac{S_o - S_u}{S_o} \cdot 100 [\%] \quad (12.8)$$

gdzie: S_u – najmniejsza powierzchnia przekroju poprzecznego próbki po rozerwaniu.

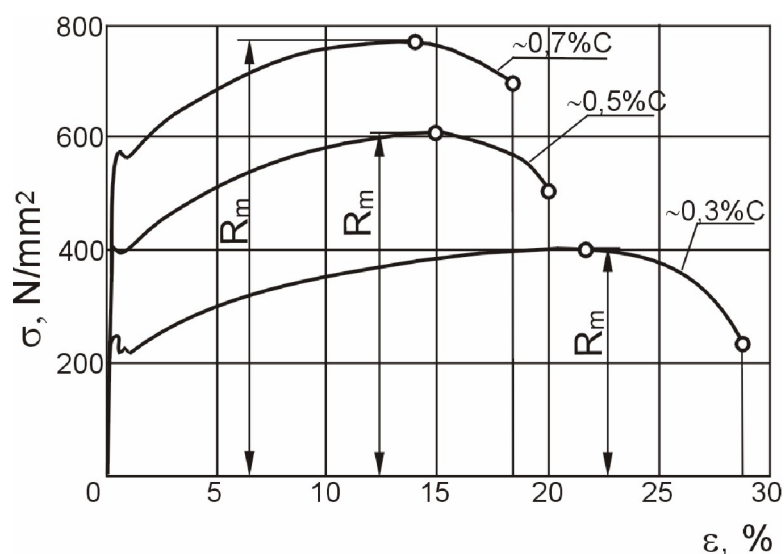
12.3.1.3. Charakterystyczne wykresy rozciągania



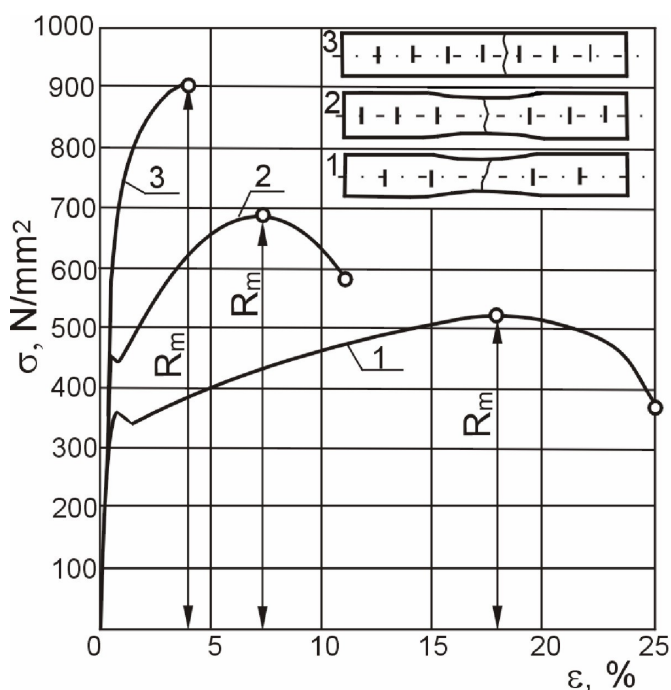
Rys. 12.6. Zmiana naprężeń nominalnych σ_n (ilorazu siły F i początkowej powierzchni przekroju poprzecznego próbki S_0) oraz naprężeń rzeczywistych σ_{rz} (ilorazu siły F i rzeczywistej, malejącej powierzchni przekroju poprzecznego próbki S_{rz}) w zależności od wydłużenia nominalnego ε_n (wydłużenia Δl odniesionego do początkowej długości pomiarowej L_0), wg S. Katarzyńskiego, S. Kocańdy i M. Zakrzewskiego



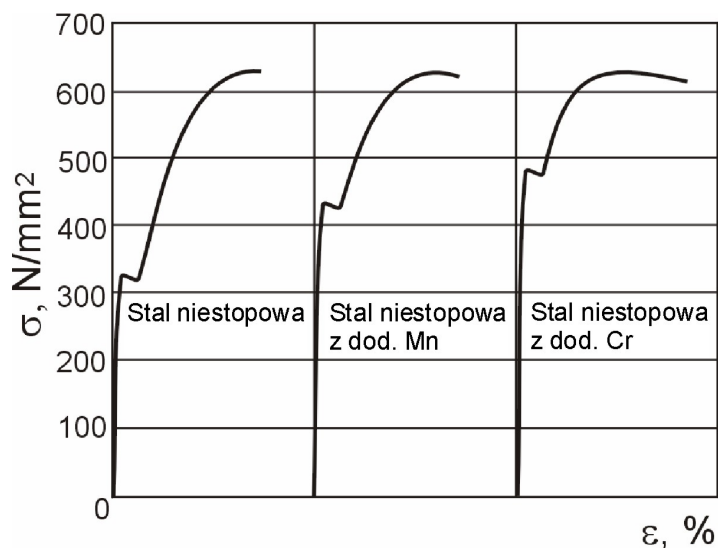
Rys. 12.7. Wykresy rozciągania metali: a) wykazujących wyraźną granicę plastyczności, b) nie wykazujących wyraźnej granicy plastyczności



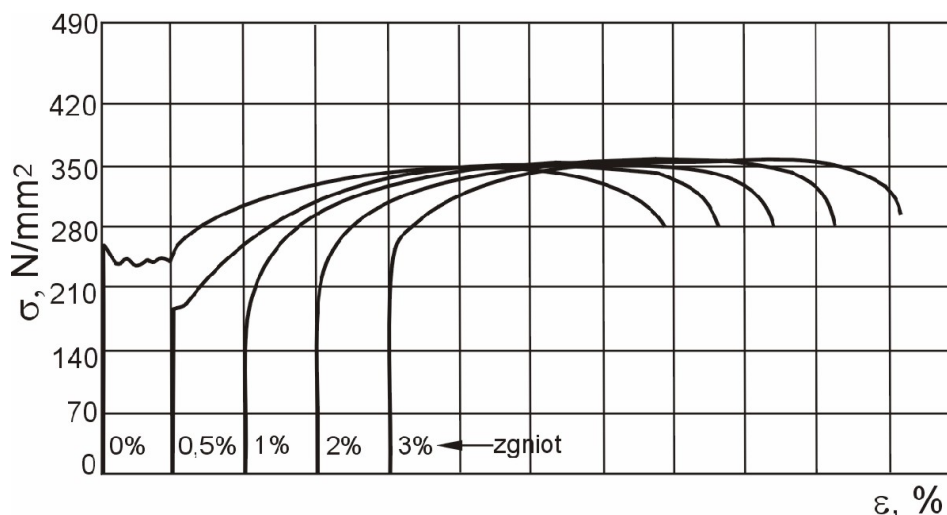
Rys. 12.8. Wpływ stężenia węgla na kształt wykresów rozciągania stali niestopowych w stanie wyżarzonym, wg S. Katarzyńskiego, S. Kocańdy i M. Zakrzewskiego



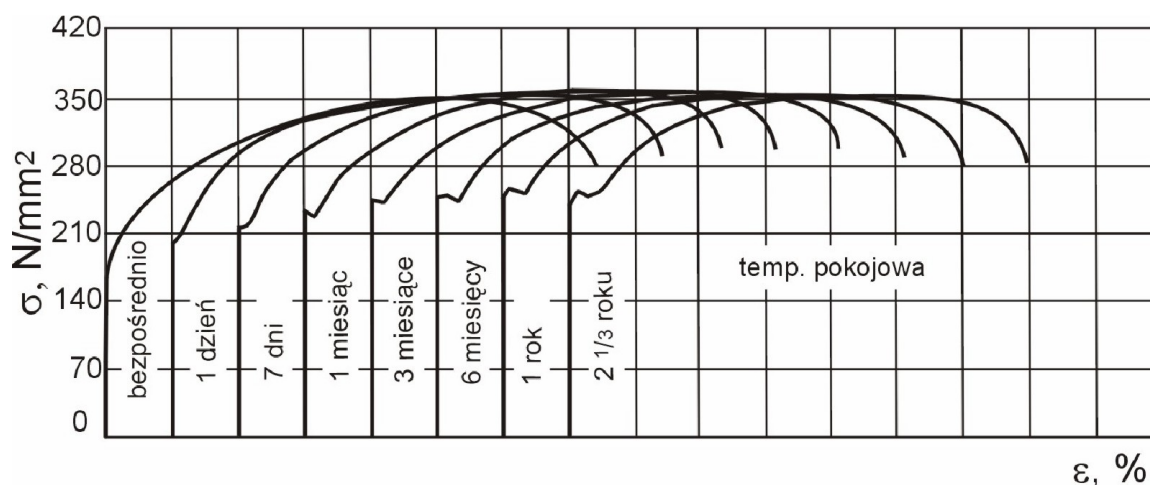
Rys. 12.9. Wpływ obróbki cieplnej na kształt wykresów rozciągania stali: 1 – w stanie wyżarzonym, 2 – w stanie zahartowanym i odpuszczonym, 3 – w stanie zahartowanym, wg S. Katarzyńskiego, S. Kocańdy i M. Zakrzewskiego



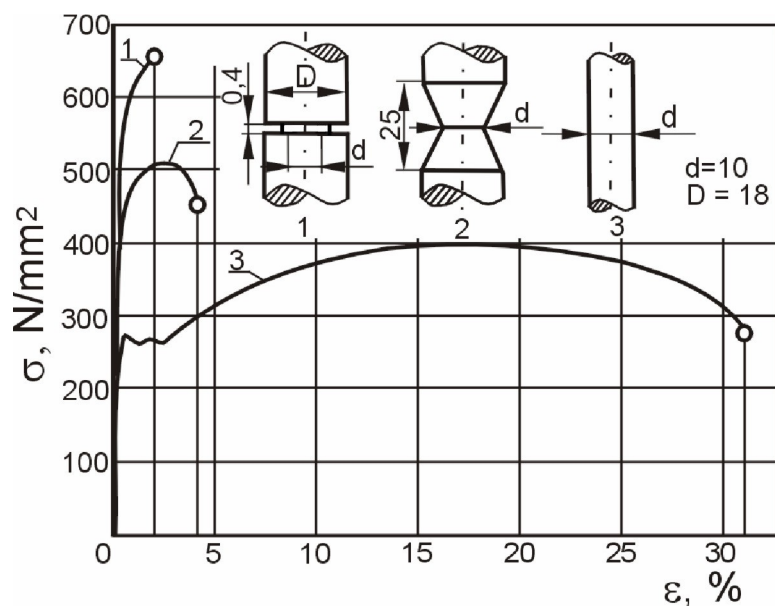
Rys. 12.10. Wpływ dodatku Mn lub Cr na wartość wyraźnej granicy plastyczności stali w stanie wyżarzonym, wg S. Katarzyńskiego, S. Kocańdy i M. Zakrzewskiego



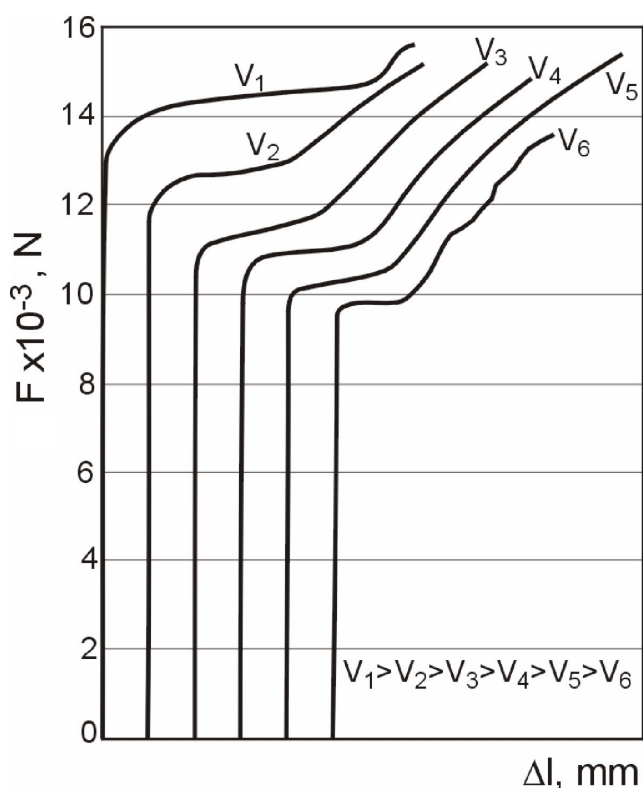
Rys. 12.11. Wpływ zgniotu na przebieg krzywych rozciągania próbek ze stali tłocznej (0,08%C), wg Kenyona i Burnsa



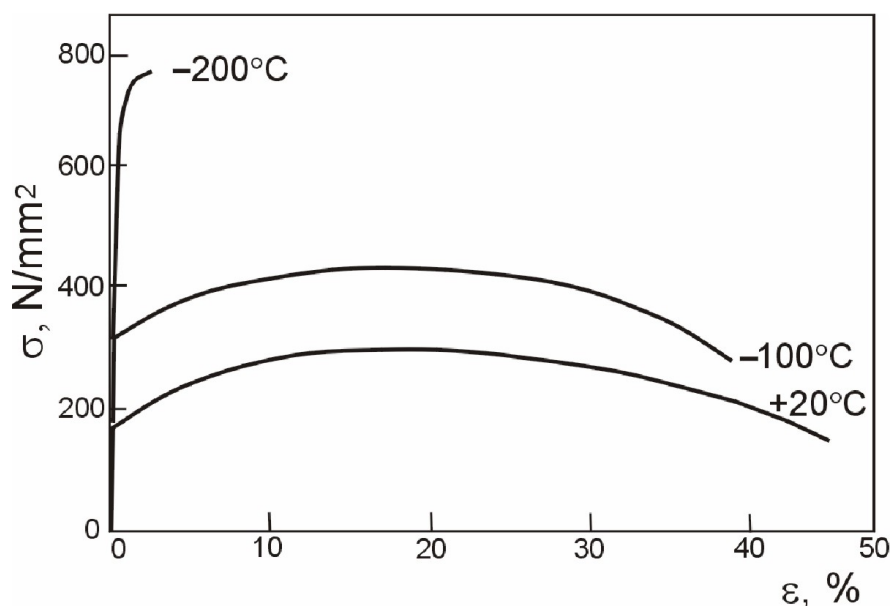
Rys. 12.12. Wpływ czasu starzenia przy temperaturze pokojowej (po 1% zgnioście) na występowanie wyraźnej granicy plastyczności w stali tłocznej (ok. 0,08%C), wg Kenyona i Burnsa



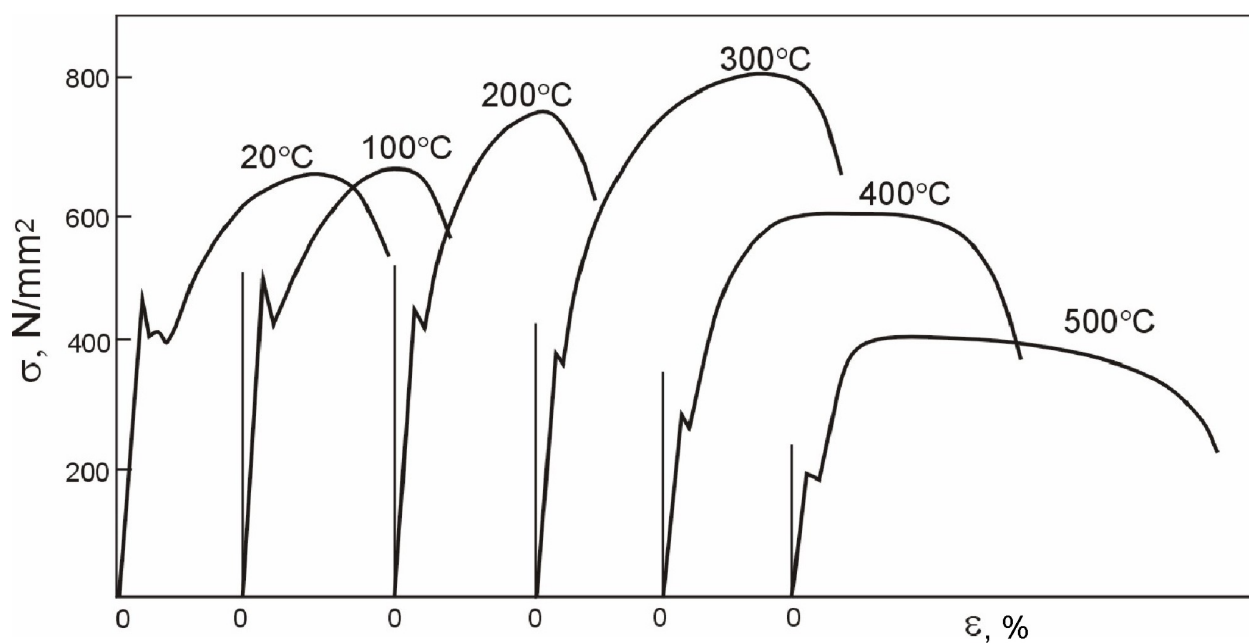
Rys. 12.13. Wpływ karbu na wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności i wydłużenie próbek o tej samej średnicy d , wykonanych ze stali wyżarzanej, wg P. Ludwika i R. Schella



Rys. 12.14. Wpływ szybkości rozciągania V próbek ze stali wyżarzanej na kształt wykresów rozciągania, wg A. Nadai



Rys. 12.15. Wpływ temperatury badania na kształt wykresów rozciągania żelaza, wg M. Blicharskiego



Rys. 12.16. Wpływ temperatury badania na kształt wykresów rozciągania stali niestopowej wyżarzanej, wg S. Katarzyńskiego, S. Kocańdy i M. Zakrzewskiego

12.3.2. Próba ściskania metali (wg PN-57/H-04320)

12.3.2.1. Cel próby i określenia podstawowe

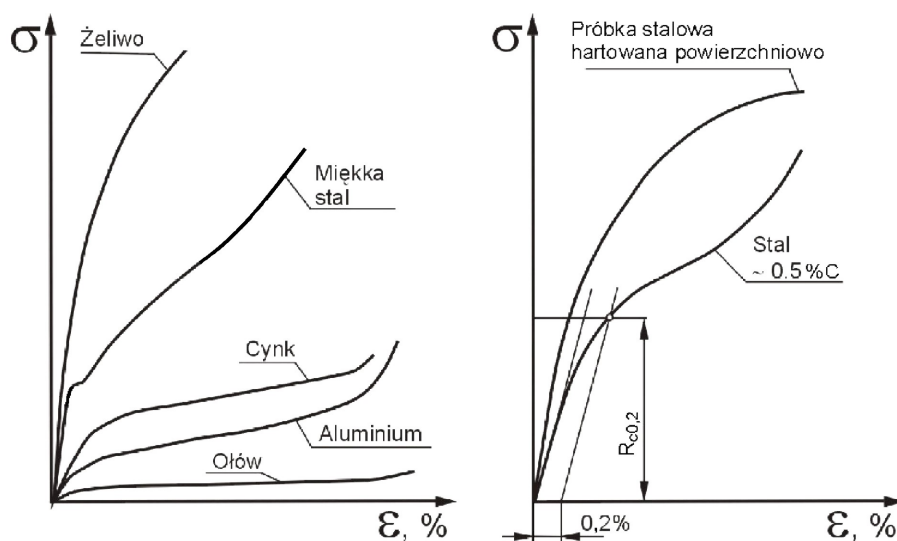
Rozróżniamy próbę zwykłą i próbę ścisłą.

Celem próby zwykłej jest wyznaczenie:

- wytrzymałości na ściskanie w przypadku gdy próbka podczas próby ulega zniszczeniu
- wyraźnej granicy plastyczności,
- skrócenia względnego,
- krzywej zależności naprężenia w funkcji odkształcenia (skrócenia).

Celem próby ścisłej jest wyznaczenie:

- współczynnika sprężystości wzdłużnej przy ściskaniu,
- umownej granicy sprężystości,
- umownej granicy plastyczności.



Rys. 12.17. Wykresy ściskania różnych materiałów metalicznych, wg S. Katarzyńskiego, S. Kocańdy i M. Zakrzewskiego

1. Wytrzymałość na ściskanie R_c – jest to naprężenie odpowiadające największej sile ściskającej P_c powodującej zniszczenie (rozkruszanie) próbki

$$R_c = \frac{P_c}{A_o} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (12.9)$$

gdzie: A_o – powierzchnia początkowego przekroju poprzecznego próbki.

2. Wyraźna granica plastyczności przy ściskaniu R_{plc} – jest to naprężenie, przy którym występuje skrócenie próbki bez zwiększania, a nawet przy zmniejszeniu siły obciążającej

$$R_{plc} = \frac{P_{plc}}{A_o} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (12.10)$$

3. Umowna granica sprężystości $R_{c0,01}$ – jest to naprężenie, którego osiągnięcie powoduje trwałe skrócenie próbki o 0,01% początkowej długości pomiarowej l_o

$$R_{c0,01} = \frac{P_{c0,01}}{A_o} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (12.11)$$

4. Umowna granica plastyczności $R_{c0,2}$ – jest to naprężenie, którego osiągnięcie powoduje trwałe skrócenie próbki o 0,2% początkowej długości pomiarowej l_o

$$R_{c0,2} = \frac{P_{c0,2}}{A_o} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (12.12)$$

5. Skrócenie względne a_c – jest to iloraz skrócenia bezwzględnego $\Delta l = l_0 - l_1$ i początkowej długości pomiarowej próbki l_0

$$a_c = \frac{l_0 - l_1}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (12.13)$$

Wartość a_c można także wyrazić w procentach początkowej długości pomiarowej l_0

$$a_c = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\% \quad (12.14)$$

gdzie: l_1 – długość pomiarowa próbki po jej odkształceniu.

6. Współczynnik sprężystości wzdłużnej przy ściskaniu E_c jest to iloraz naprężenia $\sigma = \frac{P}{A_0}$

i wywołanego tym naprężeniem skrócenia $a_c = \frac{\Delta l}{l_0}$ w zakresie odkształceń sprężystych

$$E_c = \frac{\sigma}{a_c} = \frac{P \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l} [\text{N/mm}^2] \quad (12.15)$$

12.3.2.2. Kształt i wymiary próbek

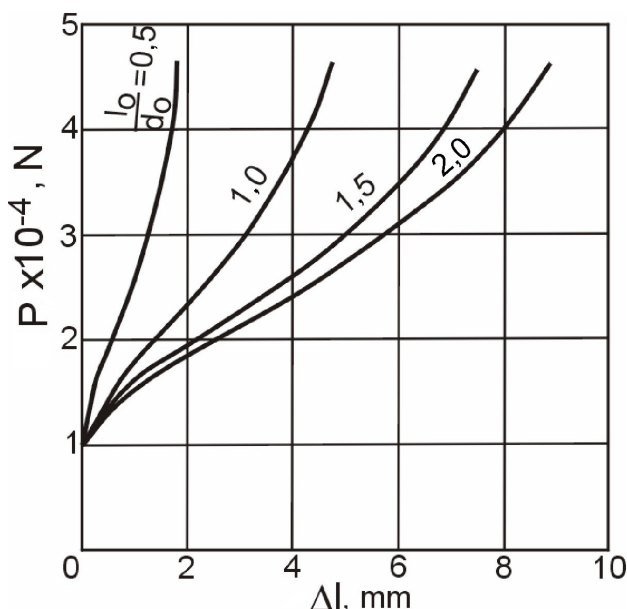
Zasadniczo stosuje się próbki o przekroju okrągłym. Zaleca się stosowanie próbek o średnicy początkowej $d_0 = 10, 20$ lub 30 mm. Początkowa długość pomiarowa próbek:

$$l_0 = x \cdot d_0 \quad (12.16)$$

gdzie: $x = 1,5$ – dla próbek do próby zwykłej,

$x = 3$ – dla próbek do próby ścisłej w przypadku nieoznaczania współczynnika sprężystości wzdłużnej E_c ,

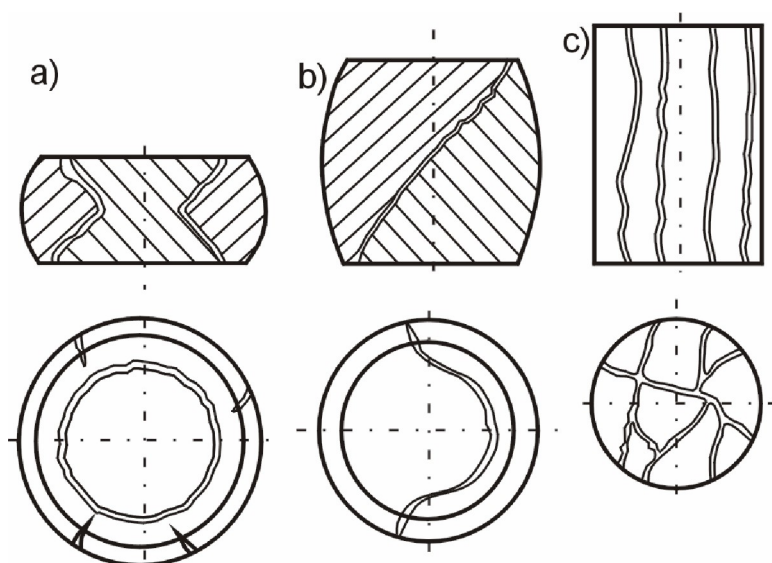
$x = 10$ – dla próbek przeznaczonych do wyznaczania współczynnika sprężystości wzdłużnej E_c .



Rys. 12.18. Przebieg krzywych ściskania próbek z miedzi o różnym ilorazie początkowej długości pomiarowej l_0 i początkowej średnicy d_0 , wg Bolszaniny

Wykres na **rys. 12.18** świadczy o silnym wpływie zakłóconego stanu naprężenia na styku próbki z płytami dociskowymi na wielkość siły rejestrowanej podczas ściskania. Wynikiem

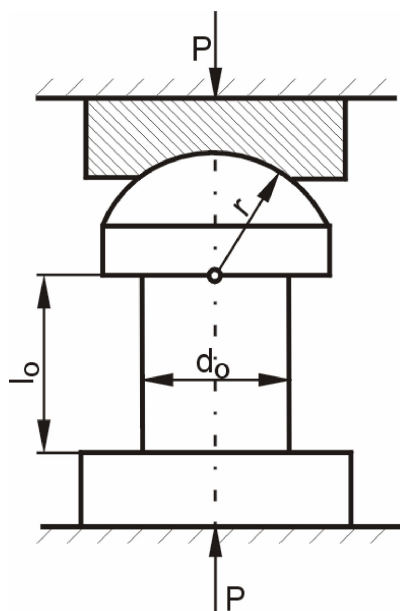
nierównomiernego odkształcania się próbki jest jej beczkowaty kształt (**rys. 12.19a,b**) oraz to, że początki pęknięcia zaczynają się od jej podstaw.



Rys. 12.19. *Próbki metalowe zniszczone w próbie statycznego ściskania: a), b) – zniszczenie poślizgowe, c) zniszczenie kruche, wg S. Katarzyńskiego, S. Kocańdy i M. Zakrzewskiego*

12.3.2.3. Płyty naciskowe

Powierzchnie płyt naciskowych powinny być płaskie, polerowane i twardsze od badanych próbek. Jedna z płyt naciskowych (najlepiej górna) powinna mieć przegub kulisty o czaszy określonej promieniem jak na **rys. 12.20**.

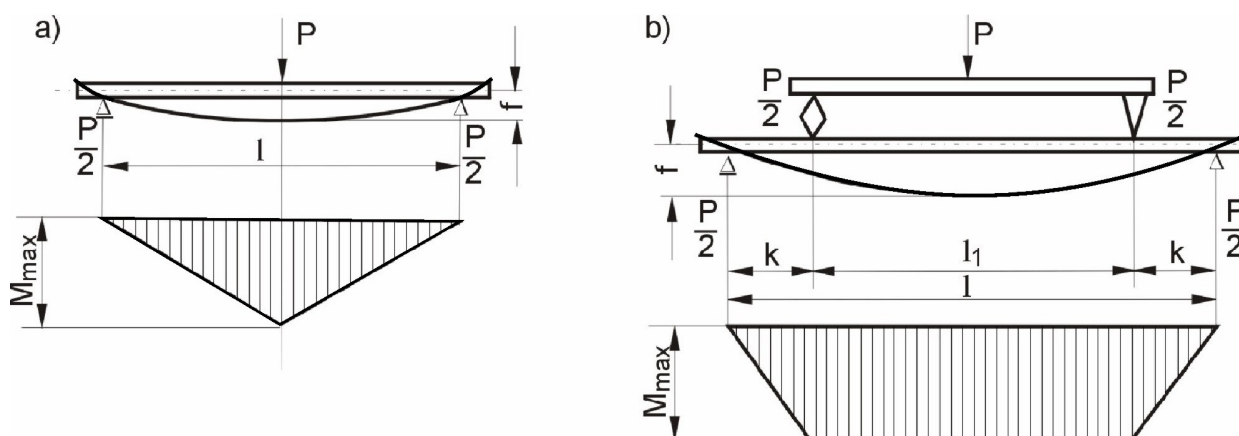


Rys. 12.20. *Próbka na ściskanie oraz prawidłowe ustawienie płyt naciskowych i przegubu kulistego, wg S. Katarzyńskiego, S. Kocańdy i M. Zakrzewskiego*

12.3.3. Próba zginania (nieznormalizowana)

Próba statyczna zginania nadaje się szczególnie do oceny własności mechanicznych metali i stopów kruchych, których własności trudno jest określić np. w próbie rozciągania (ze względu na wrażliwość takich materiałów na dodatkowe naprężenia zginające, pojawiające się nawet przy niewielkiej nieosiowości zamocowania próbki, które prowadzą do przedwczesnego zerwania próbki). Z tego powodu próba statyczna zginania jest stosowana do badania żeliw oraz stali o wielkiej twardości.

Próba statyczna zginania może być wykonana przy trój- lub czteropunktowym obciążeniu (rys. 12.21).



Rys. 12.21. Sposób obciążenia i wykresy momentów gnących w próbce zginanej obciążonej: a) siłą skupioną P w środku długości, b) symetrycznie dwoma siłami $P/2$, wg S. Katarzyńskiego, S. Kocańdy i M. Zakrzewskiego

Naprężenie zginające σ_g w próbkach o przekrojach symetrycznych wynosi:

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_g} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (12.17)$$

gdzie: M_g – moment gnący w [N·mm],

W_g – wskaźnik przekroju przy zginaniu w [mm³].

Dla obciążenia siłą skupioną w środku długości (rys. 12.21a) największy moment gnący

$$M_g = \frac{P \cdot l}{4}.$$

Dla obciążenia symetrycznego dwoma siłami $P/2$ (rys. 12.21b) największy moment gnący

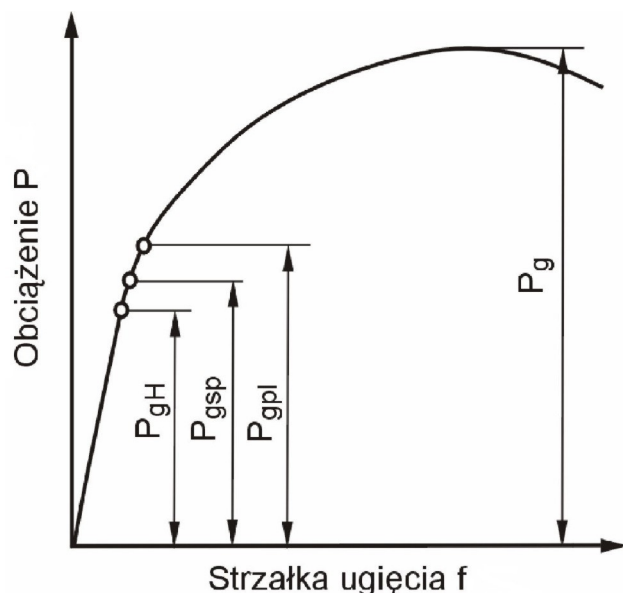
$$M_g = \frac{P \cdot k}{2}.$$

Wskaźniki przekroju przy zginaniu W_g wynoszą:

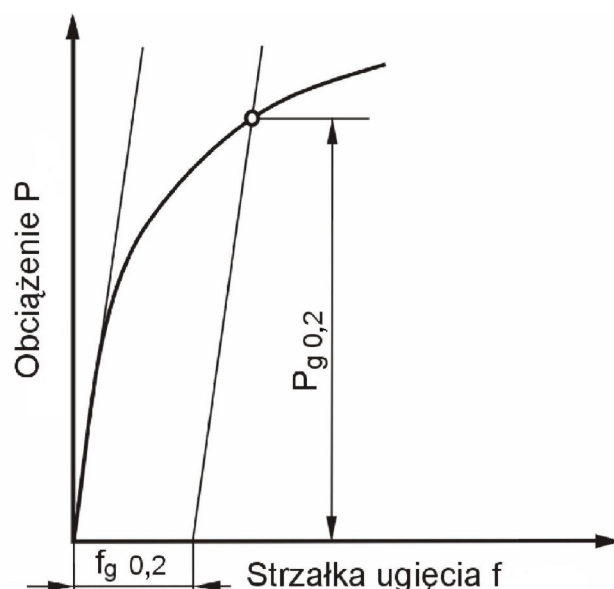
$$\text{Dla przekroju kołowego o średnicy } d_o: W_g = \frac{\pi \cdot d_o^3}{32}.$$

$$\text{Dla przekroju prostokątnego o szerokości } b \text{ i wysokości } h: W_g = \frac{b \cdot h^2}{6}.$$

Podczas próby statycznego zginania rejestruje się siłę zginającą P w funkcji strzałki ugięcia f (rys. 12.22).



Rys. 12.22. Wykres zginania materiału ciągliwego

Rys. 12.23. Sposób wyznaczania siły $P_{g0,2}$ do obliczenia umownej granicy plastyczności podczas zginania $R_{g0,2}$

Wartości $R_{gH} = \frac{P_{gH} \cdot l}{4 \cdot W_g}$ lub $R_{gH} = \frac{P_{gH} \cdot k}{2 \cdot W_g}$ oraz $R_{gsp} = \frac{P_{gsp} \cdot l}{4 \cdot W_g}$ lub $R_{gsp} = \frac{P_{gsp} \cdot k}{2 \cdot W_g}$ (w zależności

od sposobu obciążenia (rys. 12.21a lub 12.21b)) nazywane granicą stosowalności prawa Hooke'a (R_{gH}) oraz umowną granicą sprężystości przy zginaniu (R_{gsp}), które wiążą się z umownie przyjętymi wartościami odkształceń, są bardzo rzadko określane w próbie zginania.

Umowną granicę plastyczności przy zginaniu $R_{g0,2} = \frac{P_{g0,2} \cdot l}{4 \cdot W_g}$ lub $R_{g0,2} = \frac{P_{g0,2} \cdot k}{2 \cdot W_g}$ oblicza się (rys. 12.23) przyjmując, że skrajne włókno próbki ulega wówczas wydłużeniu względnemu $\varepsilon = 0,2\%$. Strzałkę ugięcia $f_{g0,2}$ odpowiadającą temu wydłużeniu oblicza się ze wzorów:

— przy obciążeniu siłą skupioną P w środku długości:

$$f_{g0,2} = \frac{l^2 \cdot \varepsilon}{6 \cdot d_o} \text{ dla przekroju kołowego; } f_{g0,2} = \frac{l^2 \cdot \varepsilon}{6 \cdot h} \text{ dla przekroju prostokątnego,}$$

— przy obciążeniu symetrycznym dwoma siłami $P/2$:

$$f_{g0,2} = \frac{(l - 2k)^2 \cdot \varepsilon}{4 \cdot d_o} \text{ dla przekroju kołowego; } f_{g0,2} = \frac{(l - 2k)^2 \cdot \varepsilon}{4 \cdot h} \text{ dla przekroju prostokątnego.}$$

Wytrzymałość na zginanie obliczona ze wzorów $R_g = \frac{P_g \cdot l}{4 \cdot W_g}$ lub $R_g = \frac{P_g \cdot k}{2 \cdot W_g}$ (w zależności

od sposobu obciążenia) może służyć tylko jako wielkość porównawcza do oceny różnych materiałów kruchych i to tylko wówczas gdy materiały te ocenia się na próbkach o jednakowym kształcie i wielkości. Próbek z metali ciągliwych nie można doprowadzić w próbie zginania do złamania.

Próbę statycznego zginania wykonuje się na ogół na próbkach okrągłych o średnicy $d_o = 10$ mm, przy czym odstęp między podporami $l = 10d_o$ lub $l = 20d_o$. Próbkę z materiałów ciągliwych mogą mieć średnicę 20 mm a nawet 30 mm. Rzadziej bada się próbki o przekroju prostokątnym. W takim przypadku wymiary próbek przyjmuje się w zależności od potrzeby. Szybkość przesuwu rolki naciskowej powinna być nie większa niż 0,1 mm/sek.

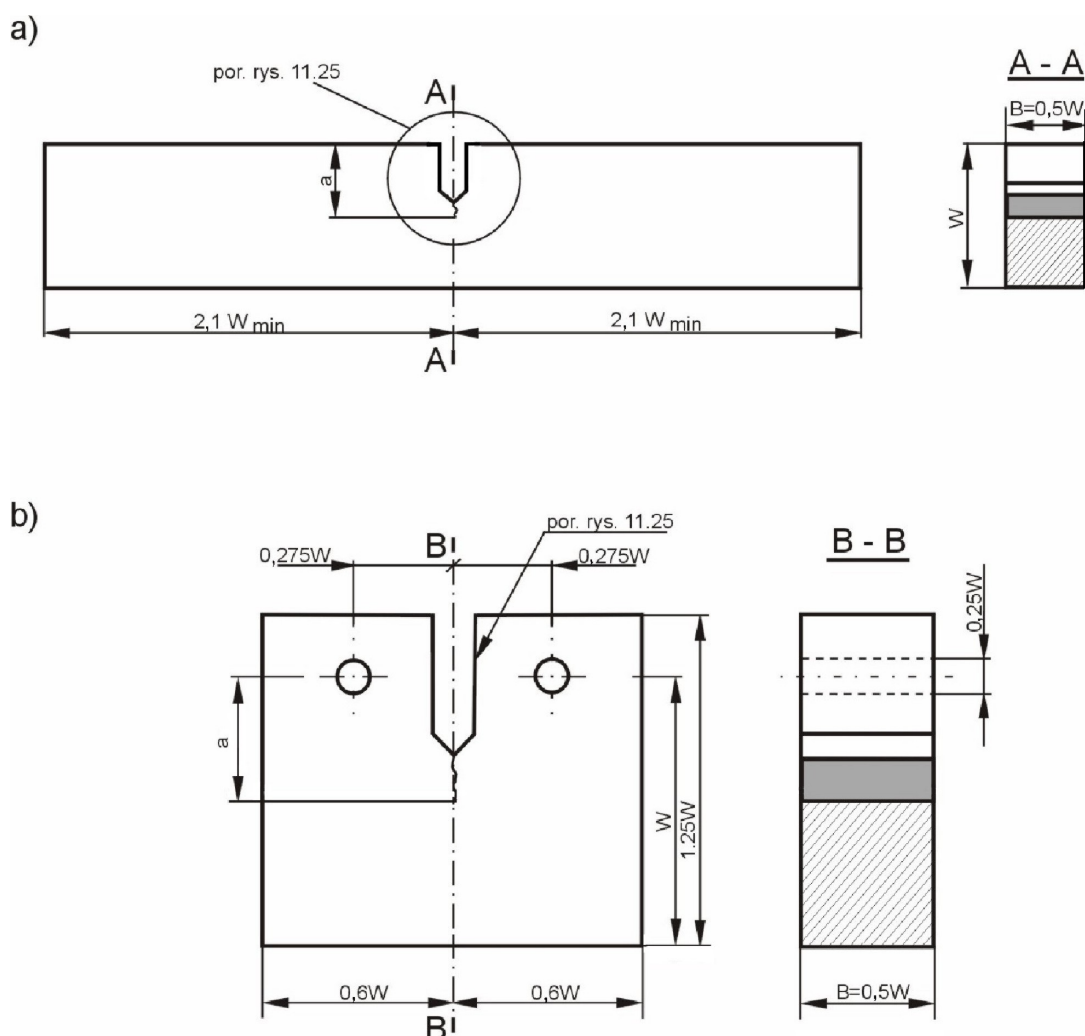
12.3.4. Próba odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia dla wyznaczenia współczynnika K_{Ic} (wg RPr PN-EN ISO 12737)

W próbie tej określa się odporność na pękanie w płaskim stanie odkształcenia jednorodnych materiałów metalowych, przy użyciu próbek z karbem i przedpęknięciem zmęczeniowym (zmęczeniowym zarodkiem pęknięcia wytworzonym na wierzchołku karbu naciętego mechanicznie), poddanych wolno wzrastającej sile rozwierającej szczelinę.

Odporność na pękanie w płaskim stanie odkształcenia K_{Ic} jest to miara odporności materiału na przemieszczanie się szczeliny w warunkach kiedy przeważa płaski stan odkształcenia u jej wierzchołka a odkształcenie plastyczne jest pomijalnie małe.

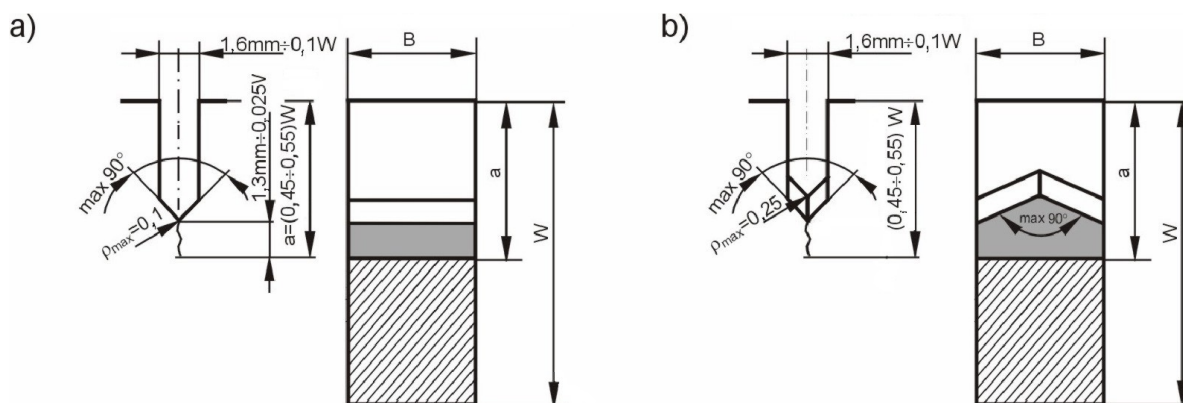
12.3.4.1. Kształt i wymiary próbek

Zalecane próbki pokazano na **rys. 12.24**. Szerokość (W) ma być równa podwójnej grubości (B). Długość szczeliny (a) powinna się mieścić w przedziale $(0,45 \div 0,55) W$.



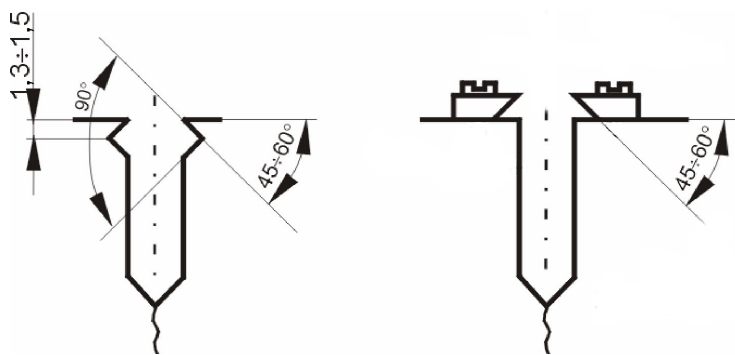
Rys. 12.24. Zalecane próbki do wyznaczania współczynnika K_{Ic} : a) próbka trójpunktowo zginana, b) próbka zwarta

Na **rys. 12.25** przedstawiono dwa stosowane kształty karbów ze zmęczeniową szczeliną początkową (przedpęknięciem).



Rys. 12.25. Kształt i wymiary karbów: a) prostego, b) daszkowego

Na rys. 12.26 przedstawiono dwa typy ostrzy wspierających do mocowania miernika rozwarcia brzegów karbu (ekstensometru).



Rys. 12.26. Szczegóły ostrzy wspierających

12.3.4.2. Przedpęknięcie zmęczeniowe

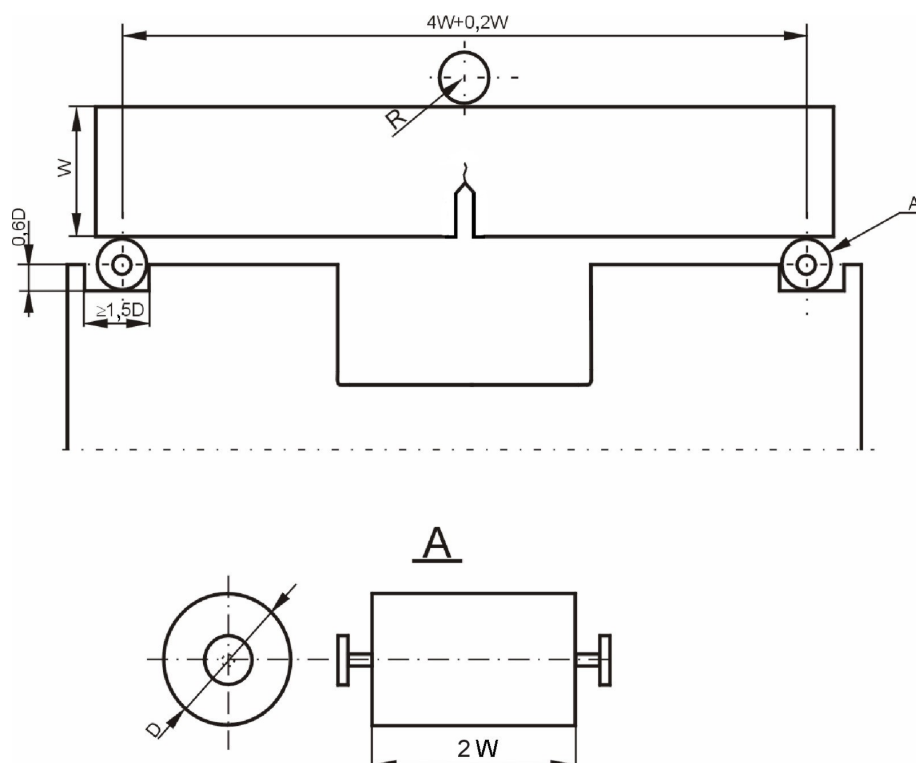
Podczas wytwarzania przedpęknięcia zmęczeniowego współczynnik intensywności naprężeń K_f nie powinien przekraczać 80% wartości K_Q określonej w następnej fazie badań i uznanej jako poprawnie określona wartość K_{Ic} .

W końcowej fazie przedpęknięcia zmęczeniowego (2,5% całkowitej długości karbu a) wartość K_f nie powinna przekraczać 60% K_Q .

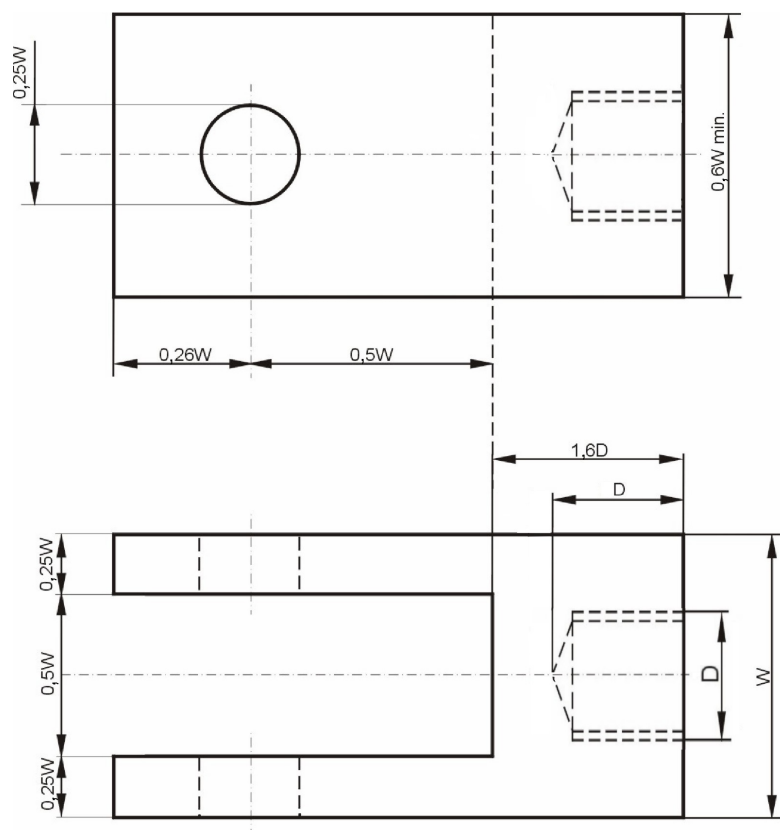
Całkowitą długość karbu (a) należy zmierzyć po złamaniu próbki z dokładnością do 0,025 mm w środku grubości próbki i w dwóch miejscach oddalonych od powierzchni zewnętrznych o $\frac{1}{4}$ grubości próbki. Jako długość pęknięcia należy przyjąć średnią z tych trzech pomiarów.

12.3.4.3. Uchwyty do badań

Zalecany uchwyt do próbek trójpunktowo zginanych pokazano na **rys. 12.27** a do próbek zwartych na **rys. 12.28**.



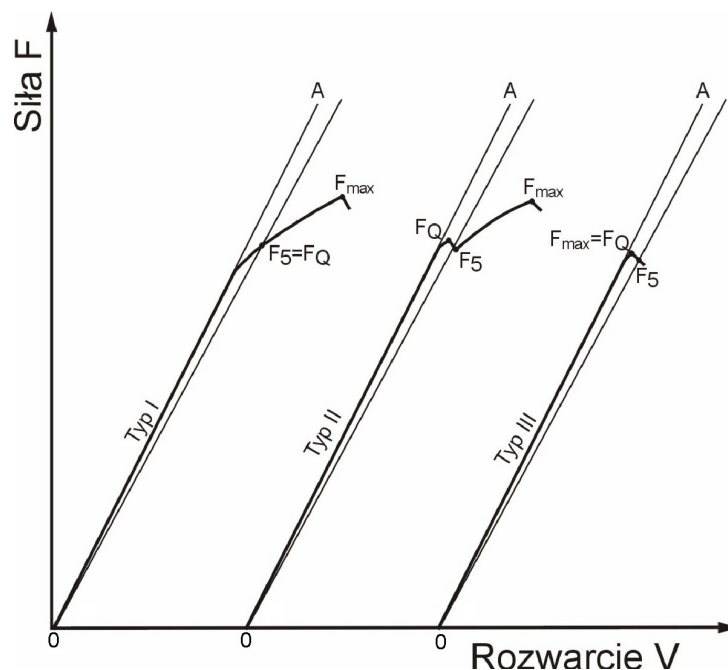
Rys. 12.27. Uchwyt próbek trójpunktowo zginanych



Rys. 12.28. Uchwyt próbek zwartych

12.3.4.4. Wykonanie próby i obliczenie K_{Ic}

Próbkę należy obciążać tak, aby szybkość wzrostu intensywności naprężeń wynosiła do $3,0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ w zakresie odkształcenia sprężystego. Próbę należy prowadzić dotąd aż siła obciążająca osiągnie maksimum. Typowe wykresy siła – rozwarcie brzegów karbu pokazano na rys. 12.29.



Rys. 12.29. Typowe wykresy siła – rozwarcie w próbie K_{Ic}

Wykresy z rys. 12.29 służą do określenia siły F_Q powodującej ściśle określony (typ I wykresu na rys. 12.29) lub nagły (typ II i III wykresu) przyrost długości karbu a (rozwarcia brzegów karbu V). Siła F_Q służy do obliczenia wstępnej wartości współczynnika intensywności naprężeń K_Q . Aby określić siłę F_Q należy poprowadzić sieczną OF_5 (patrz rys. 12.29) z punktu O z nachyleniem o 5% mniejszym niż nachylenie stycznej OA do liniowej części wykresu. Wartość siły F_Q jest równa sile F_5 jeżeli w każdym punkcie wykresu obciążenie, które poprzedza F_5 jest mniejsze niż F_5 (typ I). Jeśli siłę F_5 poprzedza maksimum obciążenia (typ III) to ta maksymalna siła $F_{max} = F_Q$. Jeżeli natomiast siłę F_5 poprzedzają lokalne (chwilowe) maksima (typ II) to najmniejsze z nich jest równe sile F_Q .

Jeżeli $F_{max}/F_Q \leq 1,10$ należy przejść do obliczenia K_Q używając niżej podanych zależności. Jeżeli $F_{max}/F_Q > 1,10$ wówczas próba nie jest poprawnym badaniem K_{Ic} .

Dla próbek trójpunktowo zginanych:

$$K_Q = \frac{4F_Q}{B \cdot W^{1/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (12.18)$$

Dla próbek zwartych:

$$K_Q = \frac{F_Q}{B \cdot W^{1/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (12.19)$$

Wartości funkcji $f\left(\frac{a}{W}\right)$ podano w tabeli 12.1.

Tabela 12.1. Wartości funkcji $f(\frac{a}{W})$ dla próbek trójpunktowo zginanych i zwartych

Iloraz $\frac{a}{W}$	funkcja $f(\frac{a}{W})$		Iloraz $\frac{a}{W}$	funkcja $f(\frac{a}{W})$	
	próbki zginane trójpunktowo	próbki zwarte		próbki zginane trójpunktowo	próbki zwarte
0,450	2,29	8,34	0,500	2,66	9,66
0,455	2,32	8,46	0,505	2,70	9,81
0,460	2,35	8,58	0,510	2,75	9,96
0,465	2,39	8,70	0,515	2,79	10,12
0,470	2,43	8,83	0,520	2,84	10,29
0,475	2,46	8,96	0,525	2,89	10,45
0,480	2,50	9,09	0,530	2,94	10,63
0,485	2,54	9,23	0,535	2,99	10,80
0,490	2,58	9,37	0,540	3,04	10,98
0,495	2,62	9,51	0,545	3,09	11,17
0,500	2,66	9,66	0,550	3,14	11,36

Jeżeli

$$B, a, (W - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (12.20)$$

to wówczas

$$K_Q = K_{Ic} \quad (12.21)$$

W przeciwnym przypadku próba nie jest poprawnym badaniem K_{Ic} .

12.3.5. Pomiary twardości

W niniejszym rozdziale opisano pomiary twardości sposobem Brinella, Vickersa i Rockwella, traktując je jako pomiary dokonywane przy obciążeniach statycznych. Pomiar twardości sposobem Shore'a oraz sposobem Leebe (przystawem Equotip) opisano w rozdziale 12.4 o pomiarach własności mechanicznych dokonywanych przy obciążeniach dynamicznych.

12.3.5.1. Pomiar twardości sposobem Brinella (wg PN-EN ISO 6506-1)

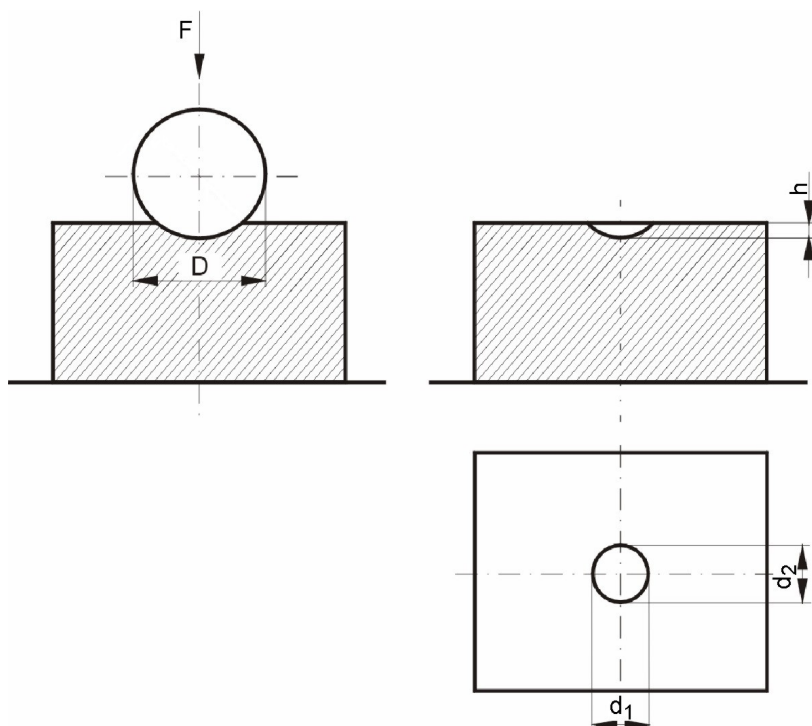
Twardość Brinella oznacza się symbolem HBW. Wgłębnikiem jest wypolerowana kulka z węglików spiekanych. W poprzednich normach w przypadku używania kulki stalowej, twardość Brinella była oznaczana symbolem HB lub HBS. Sposób Brinella umożliwia pomiar twardości w zakresie do 650HBW.

Symbol HBW poprzedzony jest wartością twardości i uzupełniany przez indeks wskazujący przyjęte warunki próby, tj. średnicę kulki (w mm) i liczbę określającą siłę obciążającą (w kG) oraz czas działania pełnego obciążenia (w sek.) jeśli jest on dłuższy niż 15 sekund, np. 500HBW 10/3000/20 - twardość Brinella równa 500 jednostek, zmierzona za pomocą kulki z węglików spiekanych o średnicy 10mm, przy zastosowaniu siły obciążającej 3000 kG (tj. 29 420 N) i czasie obciążenia 20 sekund.

Podczas pomiaru czas obciążenia powinien wynosić 10÷15 sekund.

12.3.5.1.1. Zasada pomiaru

Wgłębnik (kulka z węglików spiekanych) jest najpierw wciskany w płaską i gładką powierzchnię badanej próbki a po jego usunięciu mierzy się średnią średnicę d powstałego odcisku (rys. 12.30).



Rys. 12.30. Zasada pomiaru twardości sposobem Brinella

Twardość Brinella jest ilorazem siły obciążającej (w kG) i pola powierzchni odcisku (w mm²).

$$HBW = \frac{F}{\frac{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}} \quad (12.22)$$

gdzie: F - siła obciążająca w kG,

D - średnica kulki w mm,

$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ - średnia średnica odcisku w mm,

$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$ - głębokość odcisku w mm.

Jeżeli siłę F wyrażamy w Niutonach, to

$$HBW = \frac{1}{g_n} \cdot \frac{F}{\frac{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}} \quad (12.23)$$

gdzie g_n - przyspieszenie ziemskie równe 9,80665 m/s².

Odległość między środkami dwóch sąsiednich odcisków powinna być co najmniej trzy razy większa od średniej średnicy odcisku a odległość od brzegu próbki do środka każdego odcisku powinna być co najmniej dwa i pół raza większa od średniej średnicy odcisku.

Grubość badanej próbki powinna być co najmniej osiem razy większa od głębokości odcisku. Odształcenia na przeciwległej powierzchni próbki mogą wskazywać, że próbka jest zbyt cienka.

Siła obciążająca F powinna być tak dobrana aby średnica odcisku $d=(0,24\div0,60)\cdot D$. Dla różnych materiałów:

$$F = n \cdot D^2 \quad (12.24)$$

W tabeli 12.2 podano wartości współczynnika n dla różnych metali.

Tabela 12.2. Wartości współczynnika n dla różnych metali

Metal	stal stopy Ni stopy Ti	żeliwo o HBW		miedź i jej stopy o HBW			metale lekkie i ich stopy o HBW					
		< 140	≥ 140	< 35	35÷200	> 200	< 35	35÷80			> 80	
n	30	10	30	5	10	30	2,5	5	10	15	10	15

Stosowane są kulki o średnicach $D=10; 5; 2,5$ i 1 mm a odpowiadające im (dla różnych metali) obciążenia $F=3000; 1500; 1000; 750; 500; 250; 187,5; 125; 100; 62,5; 31,25; 30; 25; 15,625; 10; 6,25; 5; 2,5$ i 1 kG.

Aby pomiar był reprezentatywny powinno się wybierać jak największą średnicę kulki. Jeżeli tylko grubość próbki na to pozwala, zaleca się stosowanie kulki o średnicy 10 mm.

Uwaga: Nie ma możliwości dokładnego przeliczenia twardości Brinella na inne twardości lub na wytrzymałość na rozciąganie R_m . Można to zrobić tylko na podstawie wykonanych pomiarów porównawczych. Jednakże, PN-93/H-04357 oraz ASTM E 140 (por. także Metals Handbook, 8th edition, vol. 2, 1964, str. 670) podają porównania twardości określonej sposobem Vickersa, Brinella, Rockwella, Shore'a i wytrzymałości na rozciąganie R_m dla stali niestopowych i niskostopowych o jednorodnej strukturze. Porównania te są przydatne przy braku możliwości wykonania danego pomiaru sposobem wymaganym przez normy przedmiotowe. W tabeli 12.3 zamieszczono wybrane twardości określone różnymi sposobami oraz odpowiadającą im wytrzymałość R_m .

Tabela 12.3. Porównanie twardości zmierzonych sposobem Vickersa HV, Brinella HBW, Rockwella HRC i HRB, Shore'a HS i wytrzymałości na rozciąganie R_m , wg PN-93/H-04357

Wartości przybliżone																	
HV	HBW	HRC	HRB	HS	R_m [MPa]	HV	HBW	HRC	HRB	HS	R_m [MPa]	HV	HBW	HRC	HRB	HS	R_m [MPa]
940	-	68,0	-	97,3	-	423	402	43,0	-	56,1	-	200	190	-	91,5	-	640
920	-	67,5	-	-	-	420	399	42,7	-	-	1350	197	187	-	-	-	-
900	-	67,0	-	95,0	-	412	391	42,0	-	54,9	-	195	185	-	(90,5)	-	625
880	-	66,4	-	-	-	410	389	41,8	-	-	1320	191	182	-	-	-	-
865	-	66,0	-	92,7	-	402	382	41,0	-	53,7	-	190	181	-	89,5	-	610
860	-	65,9	-	-	-	400	380	40,8	-	-	1290	187	178	-	-	-	-
840	-	65,3	-	-	-	392	372	40,0	-	52,6	-	185	176	-	(88,5)	-	595
832	739	65,0	-	90,6	-	390	370	39,8	-	-	1255	183	174	-	-	-	-
820	-	64,7	-	-	-	382	363	39,0	-	51,5	-	180	171	-	87,1	-	575
800	722	64,0	-	88,5	-	380	361	38,8	-	-	1220	-	169	-	(86,8)	-	-
780	-	63,3	-	-	-	372	354	38,0	-	50,4	-	176	167	-	-	-	-
772	705	63,0	-	86,5	-	370	352	37,7	-	-	1190	175	166	-	(86,0)	-	560
760	-	62,5	-	-	-	363	344	37,0	-	49,3	-	171	163	-	-	-	-
746	688	62,0	-	84,5	-	360	342	36,6	-	-	1155	170	161	-	85,0	-	545
740	-	61,8	-	-	-	354	336	36,0	-	48,2	-	168	160	-	-	-	-
720	670	61,0	-	82,6	-	350	332	35,5	-	-	1125	-	159	-	-	-	-
700	-	60,1	-	-	-	345	328	35,0	-	47,1	-	165	157	-	84,0	-	530
697	654	60,0	-	80,8	-	340	323	34,4	-	-	1095	160	152	-	81,7	-	510
690	-	59,7	-	-	-	336	320	34,0	-	46,1	-	159	151	-	-	-	-
680	-	59,2	-	-	-	330	314	33,3	-	-	1060	-	150	-	80,0	-	-
674	634	59,0	-	79,0	-	327	311	33,0	-	45,1	-	156	148	-	-	-	-
670	630	58,8	-	-	-	320	304	32,2	-	-	1030	155	147	-	-	-	495
660	620	58,3	-	-	-	318	301	32,0	-	44,1	-	150	143	-	78,7	-	480
653	615	58,0	-	77,3	-	310	295	31,0	-	43,1	995	-	141	-	77,0	-	-
650	611	57,8	-	-	2180	302	286	30,0	-	42,2	-	-	139	-	76,0	-	-
640	601	57,3	-	-	2145	300	285	29,8	-	-	965	145	138	-	-	-	465
633	595	57,0	-	75,6	-	295	280	29,2	-	-	950	-	137	-	-	-	-
630	591	56,8	-	-	2105	294	279	29,0	-	41,3	-	142	135	-	(75,5)	-	-
620	582	56,3	-	-	2070	290	276	28,5	105	-	930	140	133	-	75,0	-	450
613	577	56,0	-	74,0	-	286	271	28,0	-	40,4	-	-	132	-	-	-	-
610	573	55,7	-	-	2030	285	270	27,8	-	-	915	138	131	-	(74,5)	-	-
600	564	55,2	-	-	1995	280	266	27,1	104	-	900	-	130	-	-	-	-
595	560	55,0	-	72,4	-	279	264	27,0	-	39,5	-	135	128	-	(73,0)	-	430
590	554	54,7	-	-	1955	275	261	26,4	-	-	880	133	127	-	(72,5)	-	-
580	545	54,1	-	-	1920	272	258	26,0	-	38,7	-	-	125	-	-	-	-
577	543	54,0	-	70,9	-	270	257	25,6	102	-	-	130	124	-	71,2	-	415
570	535	53,6	-	-	1880	266	253	25,0	-	37,8	-	128	122	-	71,0	-	-
560	525	53,0	-	69,4	1845	265	252	24,8	-	-	-	-	121	-	-	-	-
550	517	52,3	-	-	1810	260	247	24,0	101	37,0	-	126	120	-	70,0	-	-
544	512	52,0	-	67,9	-	255	243	23,1	-	-	820	125	119	-	69,0	-	400
540	507	51,7	-	-	1775	254	242	23,0	-	36,3	-	123	117	-	68,0	-	-
530	497	51,1	-	-	1740	-	240	(22,5)	100	-	-	-	116	-	-	-	-
528	495	51,0	-	66,5	-	250	238	22,2	99,5	-	800	121	115	-	67,0	-	-
520	488	50,5	-	-	1700	248	237	22,0	-	35,5	-	120	114	-	66,7	-	385
513	481	50,0	-	65,1	-	-	234	(21,5)	99,0	-	-	118	112	-	(65,5)	-	-
510	479	49,8	-	-	1665	245	233	21,3	-	-	785	116	110	-	(64,5)	-	-
500	471	49,1	-	-	1630	243	231	21,0	-	34,8	-	115	109	-	(64,3)	-	370
498	469	49,0	-	63,7	-	240	228	20,3	98,1	-	770	-	108	-	-	-	-
490	460	48,4	-	-	1595	238	226	20,0	-	34,2	-	113	107	-	(63,5)	-	-
484	455	48,0	-	62,4	-	236	224	-	-	-	-	112	106	-	-	-	-
480	453	47,7	-	-	1555	235	223	-	(97,4)	-	-	110	105	-	62,3	-	350
471	443	47,0	-	61,1	-	230	219	-	96,7	-	740	108	103	-	59,1	-	-
470	(442)	46,9	-	-	1520	225	214	-	96,0	-	720	107	102	-	58,0	-	-
460	437	46,1	-	-	1485	223	212	-	-	-	-	-	101	-	-	-	-
458	432	46,0	-	59,8	-	220	210	-	95,0	-	705	105	100	-	57,0	-	335
450	428	45,3	-	-	1455	218	206	-	-	-	-	104	99	-	-	-	-
446	421	45,0	-	58,5	-	215	204	-	94,0	-	690	103	98	-	-	-	-
440	418	44,5	-	-	1420	210	200	-	93,5	-	675	102	97	-	-	-	-
434	412	44,0	-	57,3	-	205	195	-	92,5	-	660	101	96	-	-	-	-
430	409	43,6	-	-	1385	201	191	-	-	-	-	100	95	-	56,2	-	320

cd. tabeli 12.3

Wartości przybliżone																	
HV	HBW	HRC	HRB	HS	R _m [MPa]	HV	HBW	HRC	HRB	HS	R _m [MPa]	HV	HBW	HRC	HRB	HS	R _m [MPa]
99	94	-	-	-	-	92	87	-	-	-	-	-	-	-	38,0	-	-
98	93	-	-	-	-	91	86	-	-	-	-	84	80	-	37,0	-	-
97	92	-	-	-	-	90	85	-	48,0	-	285	83	79	-	36,0	-	-
96	91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	82	78	-	35,0	-	-
95	90	-	52,2	-	305	-	-	-	43,0	-	-	-	-	-	34,0	-	-
-	-	-	51,0	-	-	88	84	-	42,0	-	-	-	-	-	33,0	-	-
-	-	-	50,0	-	-	87	83	-	41,6	-	-	-	-	-	32,0	-	-
-	-	-	49,0	-	-	86	82	-	-	-	-	80	76	-	31,2	-	-
-	-	-	-	-	-	85	81	-	41,0	-	270	-	-	-	31,0	-	-
94	89	-	-	-	-	-	-	-	40,0	-	-	-	-	-	30,0	-	-
93	88	-	-	-	-	-	-	-	39,0	-	-	-	-	-	-	-	-

12.3.5.2. Pomiar twardości sposobem Vickersa (wg PN-EN ISO 6507-1)

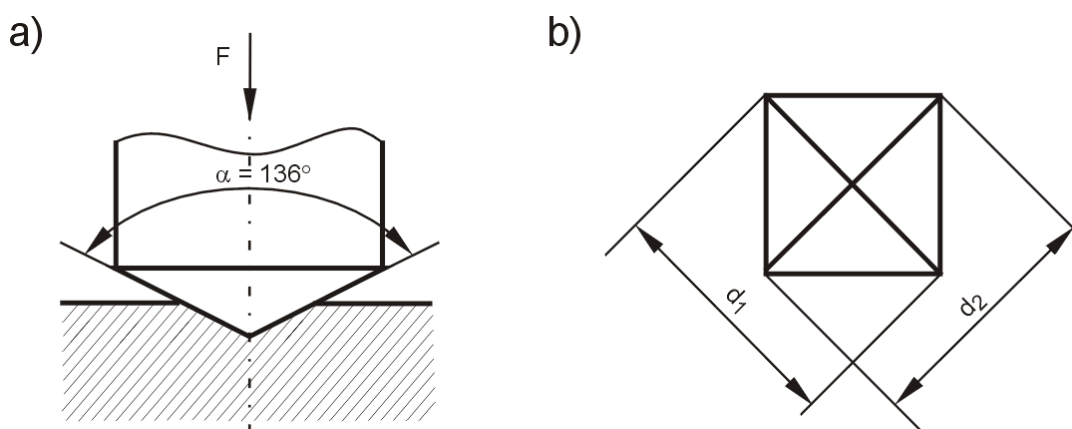
Pomiaru tego dokonuje się przy trzech różnych zakresach siły obciążającej (por. **tabela 12.4**)

Tabela 12.4. Zakresy siły obciążającej i symbole twardości

Zakres siły obciążającej F w kG	Symbol twardości	Dawne określenie
$F \geq 5$	$\geq HV5$	Próba twardości Vickersa
$0,2 \leq F < 5$	HV0,2 do $< HV5$	Próba twardości Vickersa przy małym obciążeniu
$0,01 \leq F < 0,2$	HV0,01 do $< HV0,2$	Próba mikrotwardości Vickersa

12.3.5.2.1. Zasada pomiaru

Diamantowy wgłębnik w kształcie ostrosłupa prawidłowego o podstawie kwadratowej i kącie wierzchołkowym między przeciwległymi powierzchniami bocznymi równym 136° , wciskany jest w powierzchnię badanej próbki a następnie mierzone są długości przekątnych odcisku powstałego na powierzchni po usunięciu siły obciążającej F (patrz **rys. 12.31**).



Rys. 12.31. Zasada pomiaru twardości sposobem Vickersa: a) wgłębnik, b) odcisk wgłębniaka

Twardość Vickersa jest ilorazem siły obciążającej (w kG) i pola powierzchni odcisku w mm².

$$HV = \frac{F}{d^2} = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2 \sin \frac{136^\circ}{2}} \quad (12.25)$$

gdzie: F - siła obciążająca w kG,

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} - \text{średnia przekątna odcisku w mm.}$$

Jeżeli siłę F wyrażamy w Niutonach, to

$$HV = \frac{1}{g_n} \cdot 1,854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (12.26)$$

gdzie g_n - przyspieszenie ziemskie równe 9,80665 m/s².

Twardość Vickersa jest oznaczona symbolem HV poprzedzanym wartością twardości, po którym następują: liczba określająca obciążenie w kG oraz ewentualnie czas działania siły obciążającej w sekundach, jeżeli jest on dłuższy niż 15 sekund, np. 520HV30/20 – oznacza twardość Vickersa równą 520 jednostek, zmierzoną przy użyciu siły 30 kG = 294,2 N i czasie obciążenia 20 sekund.

Podczas pomiaru czas obciążenia powinien wynosić 10÷15 sekund. Odległość między środkiem odcisku a krawędzią próbki powinna być co najmniej 2,5 razy większa od średniej przekątnej odcisku a odległość między środkami dwóch sąsiednich odcisków co najmniej 3 razy większa od średniej przekątnej odcisku.

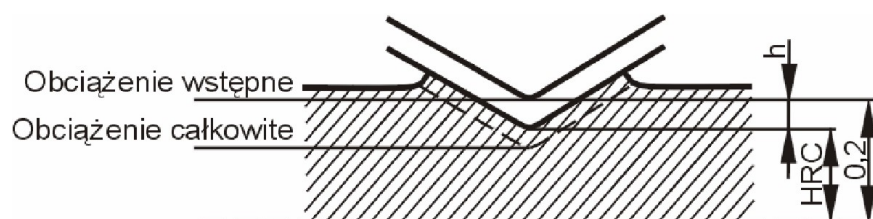
Informację na temat możliwości przeliczenia twardości Vickersa na inne twardości lub na wytrzymałość na rozciąganie zamieszczono w tabeli 12.3 w rozdziale 12.3.5.1.1 dotyczącym zasady pomiaru twardości sposobem Brinella.

12.3.5.3. Pomiar twardości sposobem Rockwella (wg PN-EN ISO 6508-1) w skali B oraz C

Twardość Rockwella jest oznaczana w zależności od skali B lub C symbolem HRB lub HRC. Pomiar polega na wciskaniu w powierzchnię badanej próbki wgłębnika, którym jest kulka stalowa lub z węglików spiekanych o średnicy 1/16" = 1,5875 mm (oznaczenie HRBS – gdy kulka jest stalowa; HRBW – gdy kulka jest z węglików spiekanych) lub stożek diamentowy o kącie wierzchołkowym 120° i promieniu krzywizny wierzchołka 0,2 mm (oznaczenie HRC).

12.3.5.3.1. Zasada pomiaru

Zasadę pomiaru zilustrowano na **rys. 12.32**. Jak widać, wciskanie wgłębnika (stożek lub kulka) w badany materiał odbywa się dwustopniowo.



Rys. 12.32. Zasada pomiaru twardości sposobem Rockwella przy użyciu stożka diamentowego. Schemat, wg S. Prowansa

Najpierw stosuje się obciążenie wstępne wynoszące 10 kG dla wyeliminowania błędów wynikających z przylegania nie obciążonego wgłębnika do powierzchni badanego materiału. Następnie zwiększa się obciążenie do 100 kG przy stosowaniu jako wgłębnika kulki lub do 150 kG przy stosowaniu stożka. Po wytrzymaniu przez 4 ± 2 sek. należy usunąć siłę obciążającą główną, pozostawiając jednak obciążenie wstępne (10 kG). Miarą twardości jest różnica umownej i rzeczywistej głębokości odcisku h (rys. 12.32). Umowna głębokość odcisku to taka jego wielkość która odpowiada twardości równej zero. Dla skali C wynosi 0,20 mm a dla skali B wynosi 0,26 mm. Ponieważ w obu przypadkach jednostką twardości jest głębokość odcisku wynosząca 0,002 mm, dlatego:

$$HRC = 100 - \frac{h}{0,002} \quad (12.27)$$

$$HRB = 130 - \frac{h}{0,002} \quad (12.28)$$

gdzie: 100 – stała odpowiadająca umownej głębokości odcisku $h = 0,20$ mm (przy której twardość mierzona stożkiem jest równa zero),

130 – stała odpowiadająca umownej głębokości odcisku $h = 0,26$ mm (przy której twardość mierzona kulą $1/16''$ jest równa zero).

Pomiar głębokości odcisku h dokonywany jest samoczynnie czujnikiem wbudowanym w twardościomierz i wywzorcowanym w jednostkach odpowiedniej skali. Zakres stosowania skali C to 20÷70HRC a skali B to 20÷100HRB.

Odległość między środkami dwu sąsiednich odcisków powinna być równa co najmniej czterokrotnej średnicy odcisku (ale nie mniejsza niż 2 mm). Odległość środka odcisku od brzegu próbki powinna być co najmniej 2,5 razy większa od średnicy odcisku (ale nie mniejsza niż 1 mm).

Przybliżone przeliczenie jednostek HRB i HRC na inne jednostki twardości oraz na wytrzymałość R_m zamieszczono w tabeli 12.3 w rozdziale 12.3.5.1.1 dotyczącym zasady pomiaru twardości sposobem Brinella.

12.4. Własności mechaniczne materiałów określane w warunkach obciążeń dynamicznych

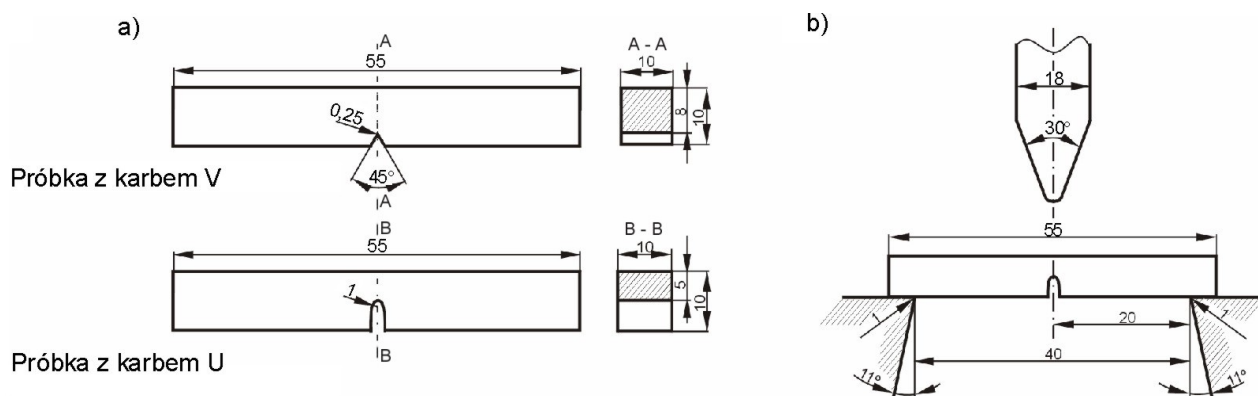
12.4.1. Próba udarności sposobem Charpy'ego (wg PN-EN 10045-1)

Próba polega na złamaniu jednym uderzeniem spadającego młota wahadłowego próbki z karbem w środku, podpartej obydwoma końcami. Energia zużyta na złamanie próbki wyrażona w dżulach (J) jest miarą udarności badanego materiału.

12.4.1.1. Próbkki

Próbka powinna mieć długość 55 mm i przekrój poprzeczny kwadratowy o boku 10 mm. W połowie długości powinien znajdować się karb. Rozróżnia się dwa rodzaje karbów:

- karb w kształcie litery V – o kącie 45° , głębokości 2 mm i promieniu zaokrąglenia jego dna 0,25 mm. W przypadku wyrobu nie pozwalającego na pobranie próbki standardowej o boku 10 mm, należy stosować próbki o szerokości 7,5 lub 5 mm z karbem V wyciętym na dowolnej, węższej powierzchni;
- karb w kształcie litery U – o głębokości 5 mm i promieniu zaokrąglenia dna 1 mm.



Rys. 12.33. Próba udarności sposobem Charpy'ego: a) próbki z karbem V i karbem U, b) ułożenie próbki na podporach

Standardowy młot powinien dysponować energią 300 ± 10 J. Energię zużytą na złamanie próbki oznacza się za pomocą symboli:

KV – dla próbki z karbem V,

KU – dla próbki z karbem U,

np. KV = 125 J oznacza, że zużyta energia na złamanie próbki wynosiła 125 J, próbka była standardowa 10x10 mm z karbem V o głębokości 2 mm a młot miał energię początkową 300 J.

Dopuszcza się stosowanie młotów o różnej początkowej energii uderzenia (300, 150, 100, 50, 10, 5 J). W takim przypadku symbol KV lub KU powinien być uzupełniany wskaźnikiem oznaczającym początkową energię młota, np. KU100 = 72 J, oznacza, że młot miał początkową energię 100 J, złamano standardową próbkę 10x10 mm z karbem U o głębokości 5 mm, a na jej złamanie zużyto energię 72 J.

W przypadku badań na pocienionych próbkach z karbem V, symbol KV powinien być uzupełniany wskaźnikiem oznaczającym w pierwszej kolejności początkową energię młota a w drugiej kolejności szerokość próbki, np. KV300/7,5 = 82 J oznacza, że początkowa energia młota wynosiła 300 J, próbka miała pomniejszoną szerokość do 7,5 mm a zużyta energia na jej złamanie wynosiła 82 J.

Jeżeli podczas próby próbka nie została złamana, tylko zgięła się i przeszła przez podpory zarejestrowana praca nie jest miarą udarności. W protokole badania należy wówczas podać, że próbka nie pękła przy energii x J.

Uwaga: Tylko wyniki otrzymane na próbkach o takim samym kształcie, rodzaju karbu i wymiarach, mogą być porównywane. Nie ma ogólnej metody przeliczania wyników otrzymywanych jedną metodą na wartości, które można otrzymać inną metodą badania.

Załącznik krajowy NA do normy PN-EN 10045-1 zaleca oznaczać udarność jako KU lub KV w J ale dopuszcza:

- oznaczanie udarności jako KCU lub KCV w J/cm^2 – wówczas energię zużytą na złamanie KU lub KV dzielimy przez przekrój próbki w miejscu karbu wyrażony w cm^2 ,
- stosowanie próbek o szerokości 7,5 oraz 5 mm nie tylko z karbem V ale również z karbem U
- stosowanie karbów U również o głębokości 2 oraz 3 mm.

12.4.2. Dynamiczno – sprężyste metody pomiarów twardości (nieznormalizowane)

Pomiary twardości sposobami statycznego wciskania wgłębnika opisane w rozdz. 12.3.5 nie mogą być zastosowane gdy wymiary wyrobu są bardzo duże, przy temperaturach obniżonych i podwyższonych lub wówczas gdy niedopuszczalne jest pozostawienie śladów wgłębnika (np.

na gładziach cylindrów silników spalinowych). Uzupełnieniem są pomiary dynamiczno – sprężyste przy użyciu przyrządów zwanych skleroskopami lub sklerometrami (z grec. skleros – twardy). Najbardziej rozpowszechnionym jest sposób Shore’a oraz sposób Leebea (przyrządem typu Equotip). Wyniki uzyskane w pomiarach dynamiczno – sprężystych są mniej dokładne niż w pomiarach statycznych, dlatego należy traktować je jako orientacyjne. Wpływ na wyniki mają: masa badanego przedmiotu (min. 5 kg), jego wymiary (min. 50 mm grubości) i kształt (np. łuki i zaokrąglenia), ustawienie przyrządu względem badanej powierzchni oraz jej chropowatość ($R_a \leq 4 \mu\text{m}$). Metody dynamiczne nie są powszechnie znormalizowane.

12.4.2.1. Pomiar twardości sposobem Shore’a (nieznormalizowany)

W skleroskopie Shore’a (model C) bijak o masie 2,36 g (1/12 uncji) prowadzony w szklanej rurce, spada z wysokości 254 mm (10 cali). Końcówka bijaka jest diamentowa i ma promień zaokrąglenia 0,01 cala. Twardość Shore’a HSC (proporcjonalna do wysokości odskoku) jest odczytywana bezpośrednio ze skali umieszczonej za szklaną rurką, w której prowadzony jest bijak.

W sklerometrze Shore’a (model D) wysokość odskoku jest odczytywana z okrągłej skali w jednostkach HSD. Bijak w przyrządach japońskich ma masę 35,2 g i spada z wysokości 19,05 mm (3/4 cala), natomiast w przyrządach amerykańskich masa bijaka wynosi 36,5 g a promień zaokrąglenia końcówek wynosi 1 mm.

Doświadczenie autora wskazuje, że sklerometry Shore’a (modele D) różnych firm wskazują istotnie różne twardości HSD i dodatkowo istotnie różne (zawyżone) wartości w porównaniu z twardościami HSC ocenianymi modelem C. Z tego powodu należy zalecać używanie modeli C i skali twardości HSC. W tabeli 12.3, umożliwiającej przybliżone przeliczanie twardości zmierzonej różnymi sposobami, twardość Shore’a oznaczona tam jako HS jest równa twardości HSC.

12.4.2.2. Pomiar twardości sposobem Leebea – przyrządem typu Equotip

Equotip (firmy Proceq – Szwajcaria) jest sklerometrem, w którym bijak o masie 5,5 g zakończony kulką z węglików spiekanych o średnicy 3 mm, wskutek wyzwolenia sprężyny, uderza w badany przedmiot z energią 11,0 Nmm i odskakuje z powrotem. Dzięki trwałemu magnesowi umieszczonemu w bijaku i cewce nawiniętej na prowadnicę bijaka, indukuje się napięcie elektryczne proporcjonalne do prędkości uderzenia i prędkości odskoku. Iloraz prędkości odskoku i prędkości uderzenia pomnożony przez 1000 jest twardością Leebea, który ten sposób pomiaru nazwał sposobem Equo.

Ponieważ wyniki pomiaru twardości Leebea HL są wskazywane cyfrowo, dlatego łatwo mogą być przeliczone na twardości HBW, HV, HRB, HRC lub HS (HSC).

Stosunkowo mała dokładność pomiarów przyrządem Equotip (o czym wspomniano we wstępie do rozdziału 12.4.2), jak i samych przeliczeń na inne jednostki (o czym wspomniano przy opisie zasady pomiaru sposobem Brinella) powoduje, że oceniona przy użyciu przyrządu Equotip twardość, np. w skali Brinella HBW lub Shore’a HSC, może być istotnie różna od rzeczywistej twardości HBW lub HSC. Mimo to, ze względu na prostotę obsługi, możliwość pomiaru w trudnodostępnych miejscach, możliwość pomiaru w warunkach obniżonej i podwyższonej temperatury, niepozostawianie śladów wgłębnika i szybkość pomiaru, przyrządy typu Equotip są często stosowane w praktyce przemysłowej.

12.5. Własności mechaniczne materiałów określone w warunkach obciążeń długotrwałych

12.5.1. Próba pełzania metali (wg PN-76/H-04330)

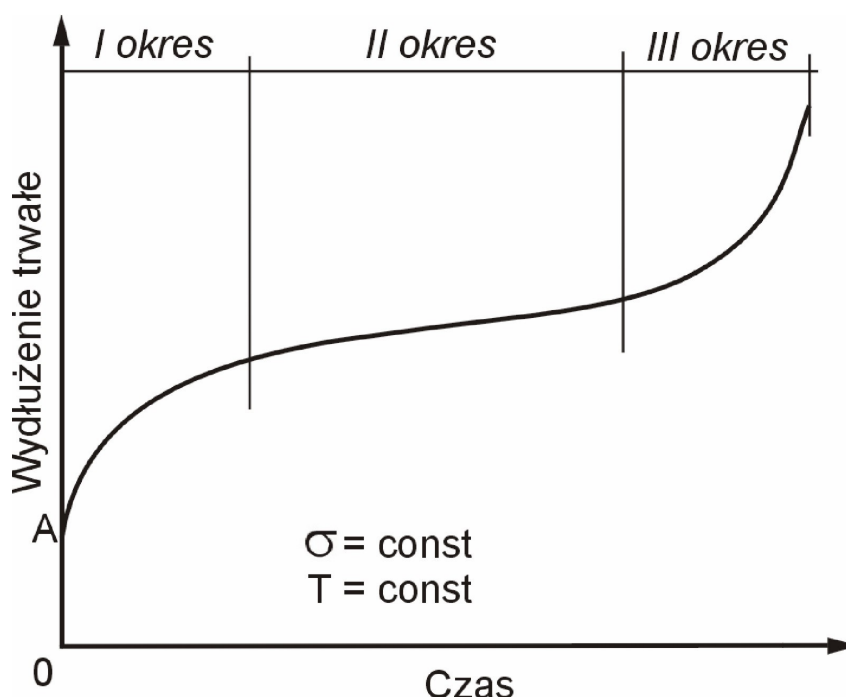
Próba polega na nagraniu próbki do żądanej temperatury, obciążeniu stałą siłą rozciągającą i mierzeniu wydłużeń w czasie trwania próby oraz czasu potrzebnego do zerwania próbki. Niekiedy prowadzi się próbę tzw. przerywaną (z okresowym odciążeniem i przerywaniem ogrzewania próbki), dla dokonania pomiaru wydłużenia przy temperaturze pokojowej. Po zerwaniu próbki mierzy się wydłużenie i przewężenie próbki również przy temperaturze pokojowej.

Na krzywej pełzania (rys. 12.34) wyróżnia się trzy okresy:

I okres - w którym prędkość pełzania maleje z upływem czasu w sposób ciągły,

II okres - w którym prędkość pełzania jest praktycznie stała,

III okres - w którym prędkość pełzania zwiększa się z upływem czasu w sposób ciągły aż do zerwania próbki.



Rys. 12.34. Krzywa pełzania. Odcinek OA jest początkowym wydłużeniem trwałym

Celem próby jest wyznaczenie:

- granicy pełzania $R_{x/t/T}$, tzn. naprężenia równego ilorazowi obciążenia próbki i jej przekroju początkowego, które działając na próbkę nagrzaną do temperatury T [w °C] przez czas t [w godz.] spowoduje jej wydłużenie trwałe o wielkość x %; wydłużenie trwałe może być mierzone podczas próby (jako różnica wydłużenia całkowitego i sprężystego) lub po odciążeniu próbki i ochłodzeniu jej do temperatury pokojowej,
- wytrzymałości na pełzanie $R_{z/t/T}$, tzn. naprężenia równego ilorazowi obciążenia próbki i jej przekroju początkowego, które działając na próbkę nagrzaną do temperatury T [w °C] przez czas t [w godz.] spowoduje jej zerwanie,
- wydłużenia po zerwaniu $A_{p/t/T}$, tzn. trwałego przyrostu długości pomiarowej próbki zerwanej przy temperaturze T [w °C] po czasie t [w godz.] wyrażonego w procentach początkowej długości pomiarowej; wskaźnik p oznacza wielokrotność początkowej długości pomiarowej L_0 w odniesieniu do średnicy początkowej d_0 lub średnicy równoważnej równej $d_o = 1,13\sqrt{S_o}$ (dla próbek o przekroju nieokrągłym),

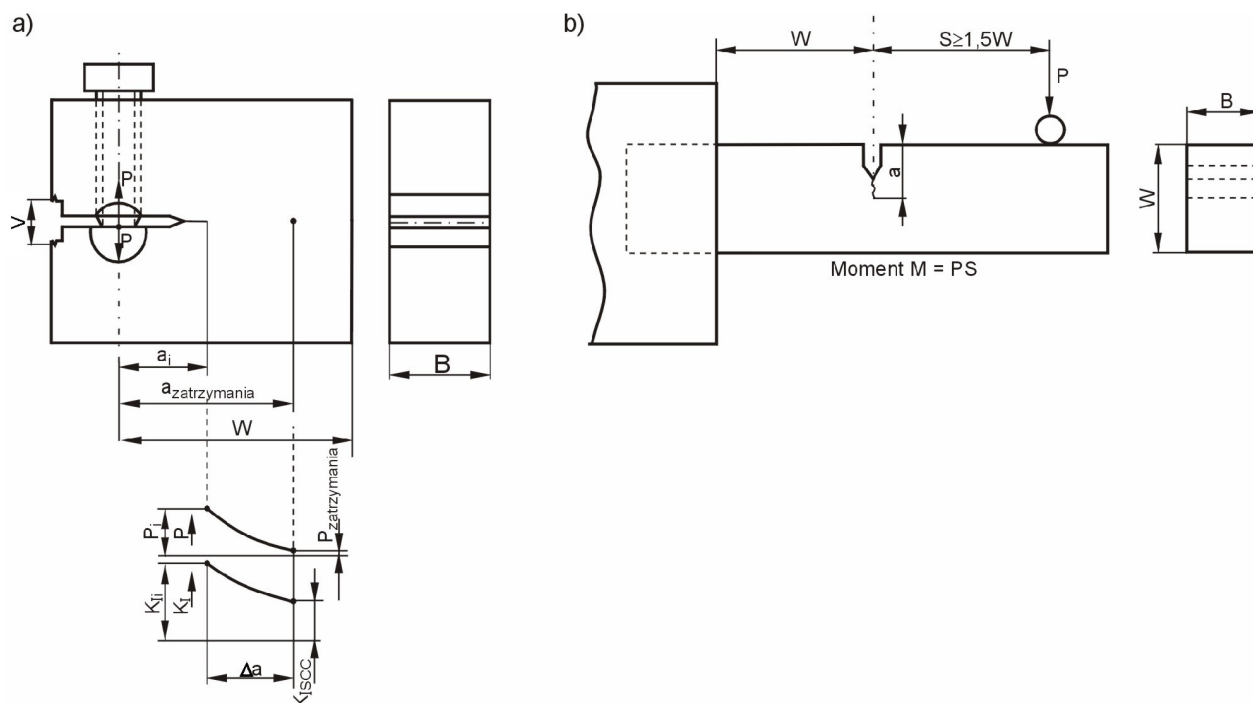
- d) przewężenia w miejscu rozerwania próbki Z_{UT} zmierzonego po rozerwaniu próbki obciążonej przy temperaturze T [w °C] przez czas t [w godz.] i wyrażonego w % przekroju początkowego.

W czasie próby pełzania stosuje się czasy $t = 100, 1000, 10\ 000, 100\ 000$ (tj. ok. 11,5 roku), 200 000 godz. oraz wydłużenia względne $x = 0,01; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1$ %.

12.5.2. Próba odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia* w warunkach korozyjnych dla wyznaczenia współczynnika K_{ISCC} (wg PN-EN ISO 7539-6)

W próbie tej określa się progowy współczynnik intensywności naprężeń w płaskim stanie odkształcenia K_{ISCC} , powyżej którego następuje zarodkowanie korozyjnego pęknięcia naprężeniowego. Badania te wykonuje się dla prognozowania trwałości (czasu życia) konstrukcji, pracujących w środowisku korozyjnym i zawierających wady typu pęknięć.

Do badań stosuje się próbki z przedpęknięciem zmęczeniowym (analogiczne jak przy wyznaczaniu współczynnika K_{Ic} – por. rozdz. 12.3.4). Próbę prowadzi się w środowisku korozyjnym, najczęściej przy stałym odkształceniu lub stałym obciążeniu (rys. 12.35).



Rys. 12.35. Metody wyznaczania współczynnika K_{ISCC} : a) przy stałym odkształceniu, b) przy stałym obciążeniu

W metodzie stałego odkształcenia próbki są obciążone za pomocą śrub rozwierających brzozy karbu (rys. 12.35a) a użytą siłę można ocenić pośrednio poprzez pomiar rozwarcia brzozy karbu. Próbkę taką łatwo jest poddać działaniu środowiska korozyjnego (poprzez ich zanurzenie). Szukaną wartość progową współczynnika K_{ISCC} wyznacza się w oparciu o wielkość siły P i długość pęknięcia a w momencie zatrzymania się rozwoju pęknięcia. Długość pęknięcia a w chwili zatrzymania jego rozwoju mierzymy po dołamaniu próbki, a siłę rozwierającą P , oceniamy podczas rozrywania próbki, gdy rozwarcie szczeliny (brzozy karbu) V osiągnie taką wielkość jaką miało wtedy gdy szczelinę rozwierała wkręcona śruba. W metodzie stałego odkształcenia (jak na rys. 12.35a):

* Przy płaskim stanie odkształcenia (gdy dominuje trójosiowy stan naprężeń) odkształcenie plastyczne jest ograniczone do obszaru w pobliżu wierzchołka pęknięcia.

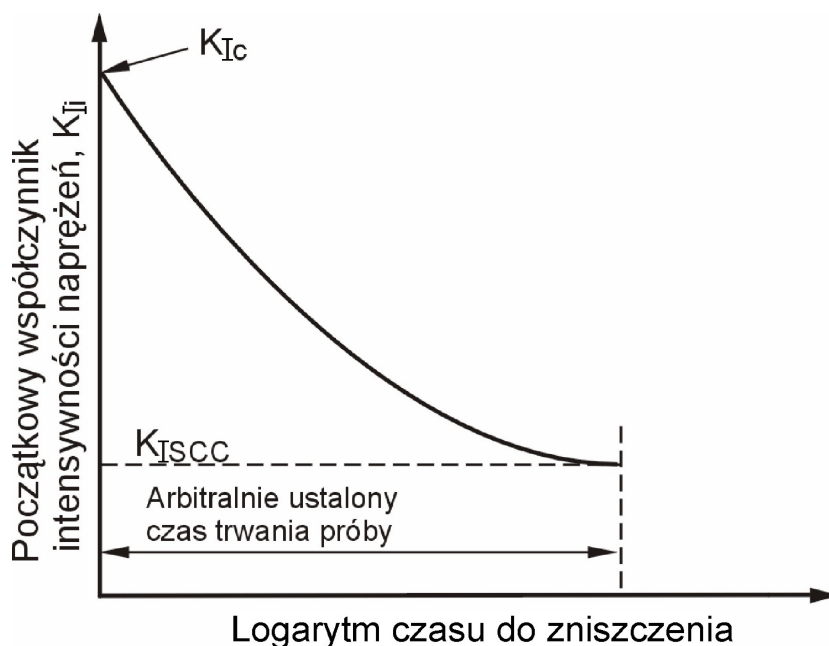
$$K_I = \frac{P}{B \cdot \sqrt{a}} \cdot Y \quad (12.29)$$

$$\text{gdzie: } Y = 30,96 \left(\frac{a}{W} \right) - 195,8 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 730,6 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 1186,3 \left(\frac{a}{W} \right)^4 + 754,6 \left(\frac{a}{W} \right)^5 \quad (12.30)$$

przy $0,3 \leq \frac{a}{W} \leq 0,8$

$$\begin{aligned} &\text{Jeżeli } B \geq 2,5 \left(\frac{K_I}{R_{p0,2}} \right)^2 \\ &\text{to } K_I = K_{ISCC} \end{aligned} \quad (12.31)$$

W metodzie stałego obciążenia (rys. 12.35b) próbki trudniej jest poddać działaniu środowiska w obszarze karbu ale oceny wielkości siły użytej do obciążenia dokonuje się bezpośrednio. Do oceny K_{ISCC} używa się kilku próbek naprężonych do różnych poziomów początkowego współczynnika intensywności naprężeń K_{II} (por. **rys. 12.36**), mniejszych od wartości K_{Ic} . Jako wartość K_{ISCC} przyjmuje się taką wartość współczynnika K_{II} , która spowoduje pęknięcie próbki ale dopiero po arbitralnie przyjętym czasie*.



Rys. 12.36. Graficzne przedstawienie wyników badania korozji naprężeniowej metodą stałego obciążenia

Na rys. 12.36 zilustrowano wartość progową K_{ISCC} ocenioną metodą stałego obciążenia, którą dla schematu jak na rys. 12.35b obliczamy na podstawie przyłożonej siły P oraz początkowej długości pęknięcia a , którą określamy po złamaniu próbki.

W metodzie stałego obciążenia (jak na rys. 12.35b):

$$K_{II} = \frac{P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot Y \quad (12.32)$$

* Wg PN-EN ISO 7339-6 minimalne czasy, które musi wytrzymać materiał w danym środowisku wynoszą: 10 godz. – dla stopów tytanu, 100 godz. – dla wysokowytrzymałych stali niskostopowych oraz 1000 godz. – dla stali o mniejszej wytrzymałości oraz wysokostopowych stali utwardzanych wydzieleniowo (maraging) i stopów aluminium.

$$\text{gdzie } Y = 6,21 \sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^3} - \left(1 - \frac{a}{W}\right)^3} \quad (12.33)$$

przy $0,2 \leq \frac{a}{W} \leq 0,6$

$$\text{jeżeli } B \geq 2,5 \left(\frac{K_{II}}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (12.34)$$

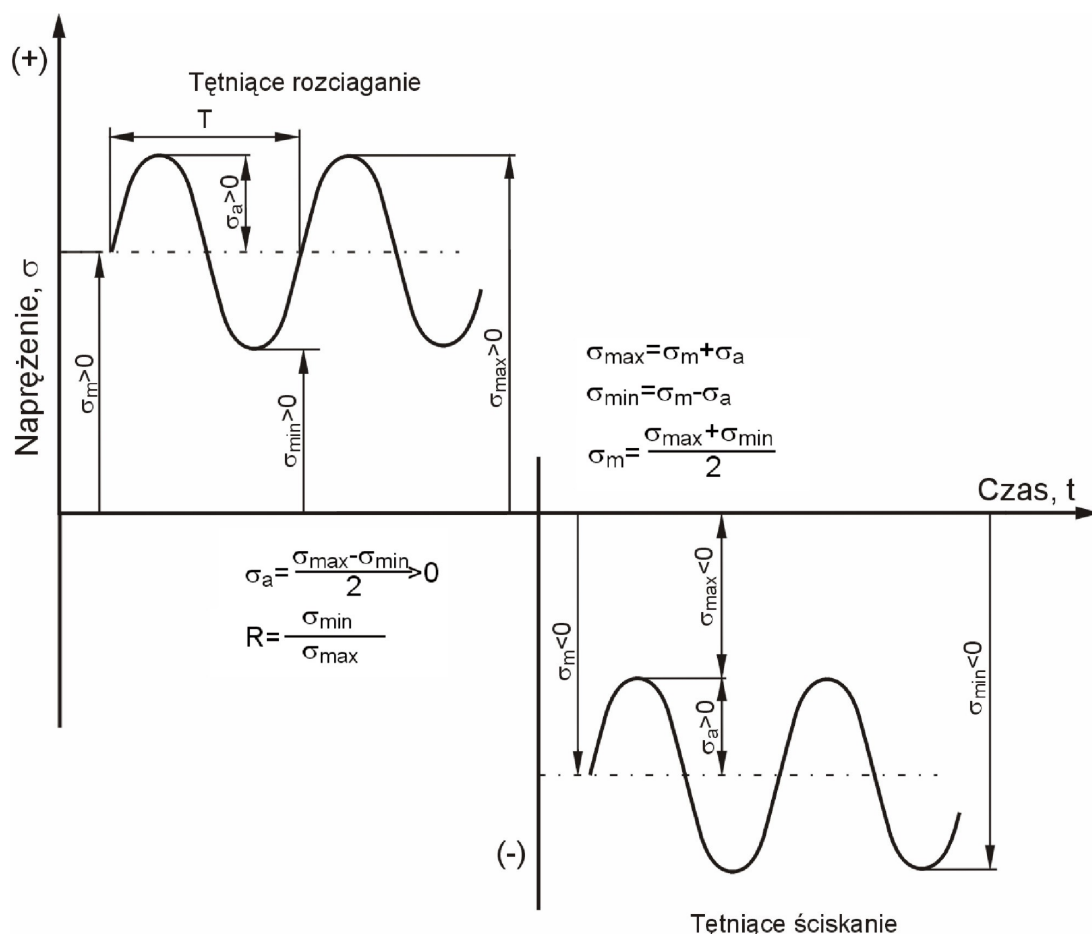
$$\text{to } K_{II} = K_{ISCC} \quad (12.35)$$

12.6. Badania własności mechanicznych w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych (zmęczeniowych)

12.6.1. Pojęcia podstawowe (wg PN-76/H-04325)

Zmęczenie metalu – jest to proces zmian występujących w nim pod wpływem działania zmiennych naprężeń (odkształceń). Zmiany te to obniżenie wytrzymałości, trwałości lub zniszczenie metalu wskutek pęknięcia.

Cykl naprężeń – zmiana naprężenia w okresie (T), która charakteryzuje się częstotliwością (f), wielkością i rodzajem naprężeń (σ lub τ) oraz współczynnikiem asymetrii cyklu (R) – rys. 12.37.

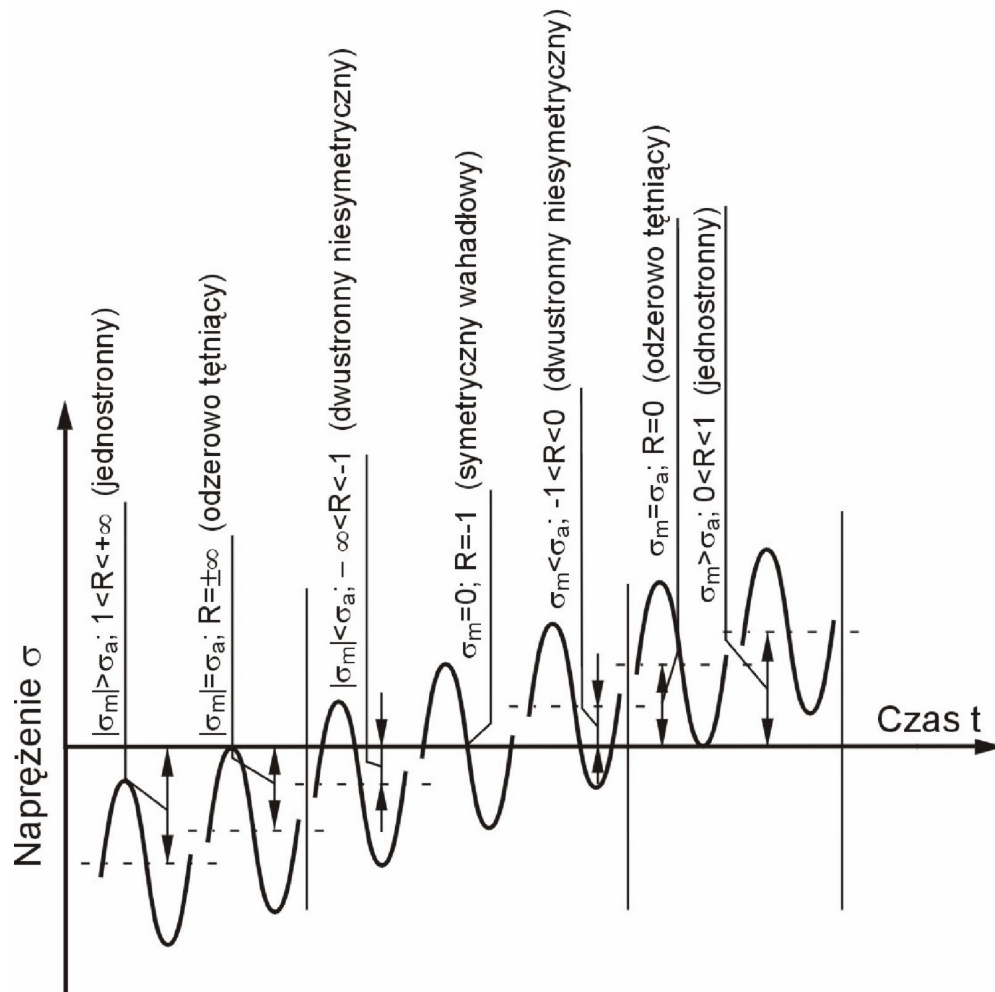


Rys. 12.37. Objaśnienie wzorów $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$, σ_m , σ_a

Naprężenie cykliczne – naprężenie o okresowo zmieniających się wartościach od maksymalnych $\sigma_{\max}$ do minimalnych $\sigma_{\min}$ w sposób powtarzalny w czasie kolejnych okresów zmiennych T :

- a) średnie naprężenie cyklu $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$
- b) amplituda cyklu $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$
- c) zakres zmiany naprężeń $2\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$
- d) współczynnik asymetrii cyklu $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$

Rodzaje cykli naprężeń zilustrowano na rys. 12.38.



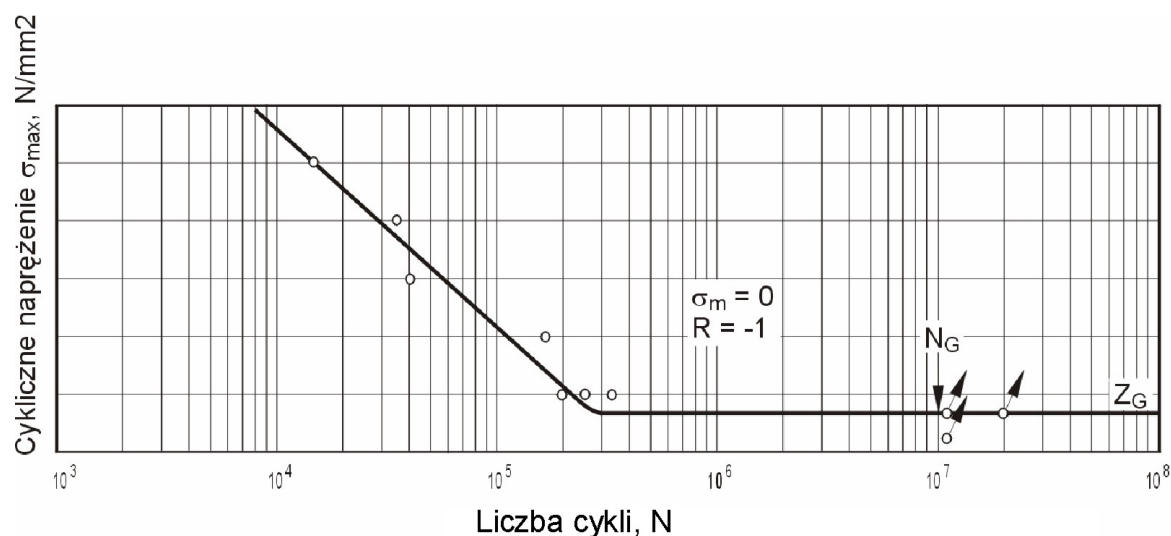
Rys. 12.38. Rodzaje cykli naprężeń w zależności od współczynnika asymetrii cyklu R

12.6.2. Metodyka badań zmęczeniowych

Badania należy zaczynać od takiego poziomu naprężeń, przy którym wystąpi zniszczenie próbek po około 10^4 cykli, a następnie naprężenia należy kolejno zmniejszać aż do wielkości, przy której badane próbki nie ulegną zniszczeniu przy N_G cykli.

Dla stali przyjmuje się $N_G = 10^7$ cykli a dla metali i stopów nieżelaznych $N_G = 2 \times 10^7 \div 10 \times 10^7$ cykli w zależności od rodzaju stopu, przy częstotliwościach zmian obciążenia $5 \div 100 \text{ Hz}$ (stałej dla danej serii próbek).

Kryterium zniszczenia próbki jest jej pęknięcie, po którym przełom powinien wykazywać charakterystyczne linie zmęczenia widziane makroskopowo oraz prążki zmęczenia obserwowane mikroskopowo. Prążki są śladem przemieszczającego się w każdym cyklu pęknięcia i są prostopadłe do kierunku pęknięcia. Wyniki badań nanosi się na wykres Wöhlera w skali półlogarytmicznej (rys. 12.39).



Rys. 12.39. Wykres Wöhlera

N_G – umowna, graniczna liczba cykli naprężeń, przyjęta jako podstawowa dla zakończenia próby zmęczeniowej próbek, które nie uległy zniszczeniu,

Z_G – wytrzymałość na zmęczenie równa takiemu największemu naprężeniu cyklicznemu

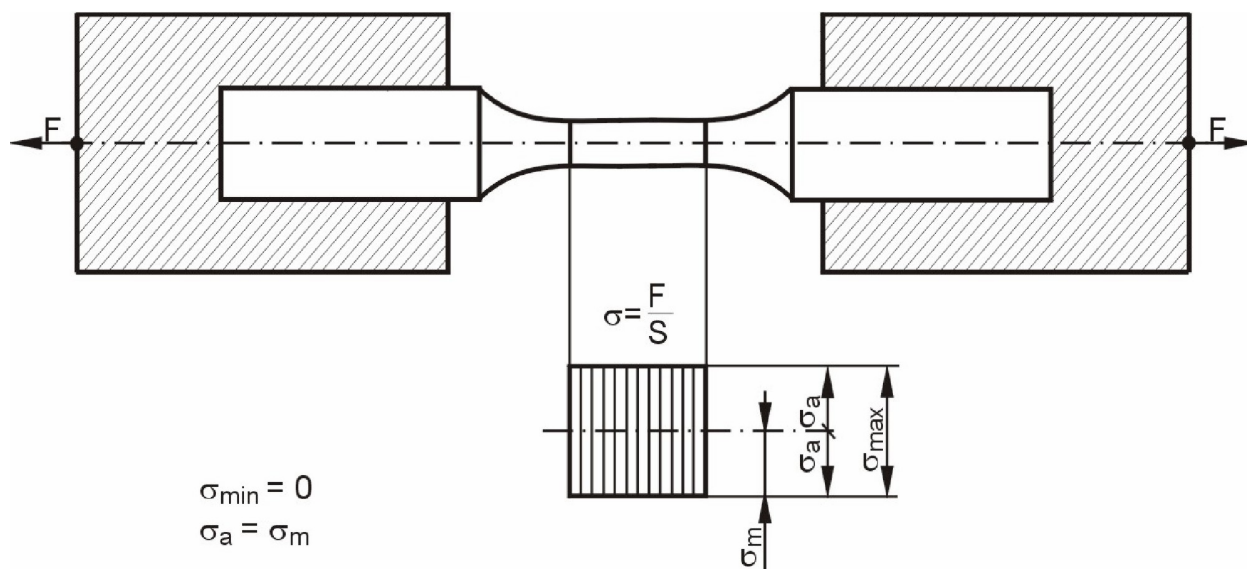
$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{S_o}, \text{ gdzie } F_{\max} \text{ jest największym obciążeniem a } S_o \text{ początkowym przekrojem}$$

próbki, przy którym próbki nie ulegają zniszczeniu w ciągu umownej liczby cykli N_G .

12.6.2.1. Próba osiowego rozciągania – ściskania przy stałym cyklu obciążeń (wg PN-74/H-04327)

Celem próby jest wyznaczenie wskaźników charakteryzujących zachowanie się metali w warunkach okresowo – zmiennych naprężeń, wywołanych wahadłowym rozciąganiem i ściskaniem albo tętniącym rozciąganiem lub ściskaniem.

Stosuje się próbki okrągłe i płaskie o stałym lub zmiennym (wg promienia R) przekroju oraz zawierające karby V lub karby U jak również próbki płaskie z otworem. Na rys. 12.40 zilustrowano sposób przyłożenia obciążenia oraz charakterystyczne wielkości naprężeń dla próbki obciążonej naprężeniem rozciągającym, tętniącym od zera.

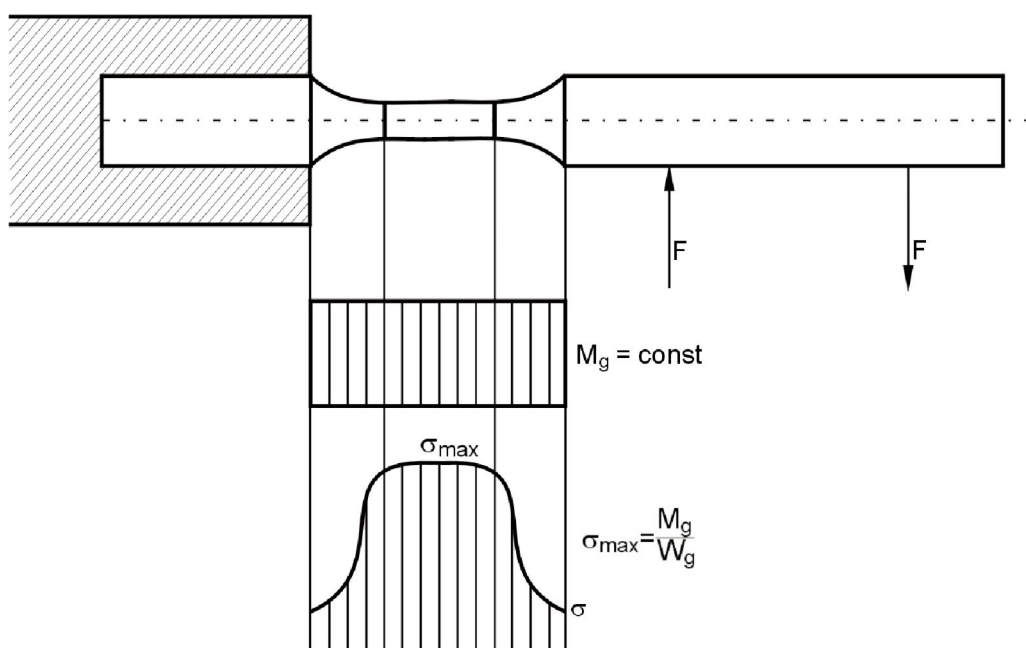


Rys. 12.40. Rozkład naprężeń w przypadku odzerowo tętniącego rozciągania

12.6.2.2. Próby zmęczenia przy zginaniu (wg PN-76/H-04326)

Celem tych prób jest wyznaczenie wskaźników charakteryzujących zachowanie się metali w warunkach okresowo – zmiennych naprężeń, wywołanych zginaniem obrotowym lub zginaniem płaskim.

Stosuje się próbki okrągłe i płaskie o stałym i zmiennym (wg promienia R) przekroju, próbki okrągłe z karbem V i z karbem U, płaskie z karbem oraz płaskie z otworem. W celu określenia własności zmęczeniowych metali zaleca się obciążać próbkę stałym momentem zginającym na jej długości pomiarowej (rys. 12.41). Aby to osiągnąć, wolny koniec próbki musi być obciążony parą sił F . W takim przypadku badaniu podlega większa objętość materiału próbki.



Rys. 12.41. Rozkład naprężeń i momentu zginającego w przypadku zginania próbki o stałym przekroju, obciążonej z jednej strony parą sił

12.6.2.3. Próba zginania obrotowego

Zaleca się ją wykonywać na próbkach okrągłych. Podczas próby próbka obraca się a stały moment zginający działa w płaszczyźnie przechodzącej przez oś próbki.

W próbie zginania obrotowego wyznacza się Z_{go} – wytrzymałość na zmęczenie przy próbie zginania obrotowego.

12.6.2.4. Próba zginania płaskiego

Zaleca się ją wykonywać na próbkach płaskich. Próbę zginania płaskiego można prowadzić jako zginanie wahadłowe dla wyznaczenia Z_{gw} – wytrzymałości na zmęczenie przy zginaniu wahadłowym, jako zginanie tętniące od zera dla wyznaczenia Z_{gj} – wytrzymałości na zmęczenie przy zginaniu odzerowo tętniącym (jednostronnym) oraz jako zginanie przy dowolnym cyklu zginania (ale przy określonym współczynniku asymetrii cyklu $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$) dla wyznaczenia Z_g – wytrzymałości na zmęczenie przy zginaniu.