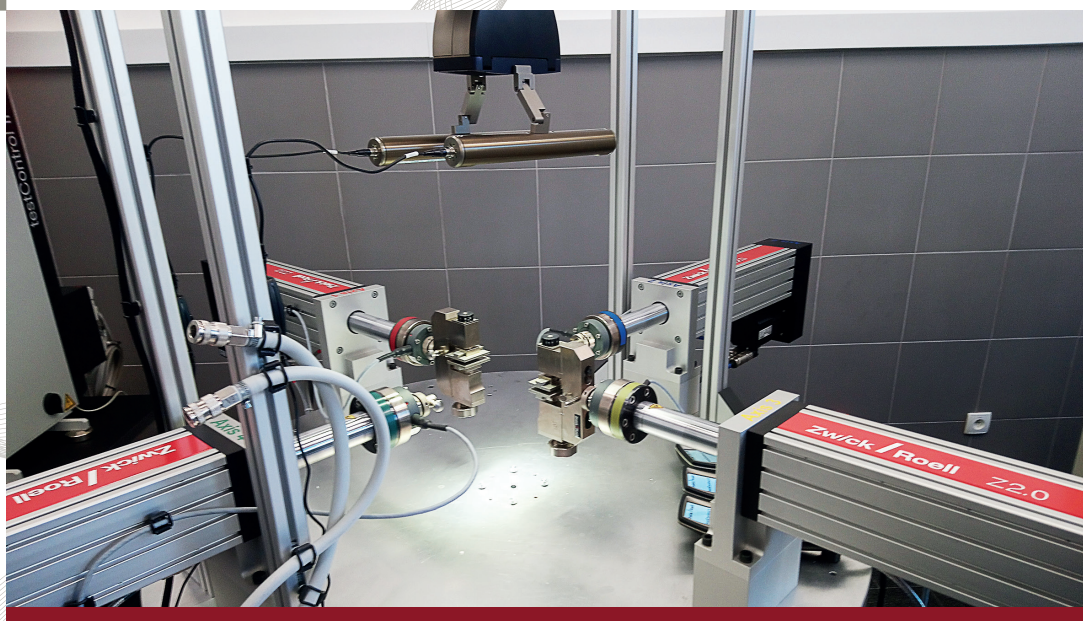


Wiktorja Wojnicz, Edmund Wittbrodt

MECHANICZNE METODY BADAŃ MATERIAŁÓW



Ćwiczenia laboratoryjne

Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

RECENZENCI

Izabela Lubowiecka

Stanisław Wojciech

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI

Wioleta Lipska-Kamińska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://sklep.pg.edu.pl/pl/>



UZNANIE AUTORSTWA
UŻYCIE NIEKOMERCYJNE
BEZ UTWORÓW ZALEŻNYCH

Publikacja jest dostępna na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa –
Użycie niekomercyjne – Bez utworów zależnych 4.0 Międzynarodowe
(CC BY-NC-ND 4.0), dostępnej pod adresem
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.pl>

ISBN 978-83-7348-810-6

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 8,5, ark. druku 10,5, 224/1103

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

Spis treści

1. Wstęp	7
2. Laboratorium wytrzymałości materiałów na Wydziale Mechanicznym PG	9
3. Ćwiczenia laboratoryjne	18
3.1. Statyczna próba rozciągania metali	18
3.1.1. Cel badań	18
3.1.2. Podstawowe pojęcia	18
3.1.3. Wykonanie badań	22
3.1.4. Unieważnienie próby rozciągania	31
3.1.5. Przygotowanie raportu z badań	31
3.2. Wyznaczanie modułu sprężystości podłużnej, umownej granicy sprężystości i umownej granicy plastyczności	31
3.2.1. Cel ćwiczenia	31
3.2.2. Podstawowe definicje	31
3.2.3. Wykonanie badań	34
3.2.4. Unieważnienie próby rozciągania	39
3.2.5. Przygotowanie raportu z badań	39
3.3. Statyczna próba ściskania metali	39
3.3.1. Cel ćwiczenia	39
3.3.2. Podstawowe definicje	39
3.3.3. Wykonanie badań	40
3.3.4. Ściskanie metali plastycznych	41
3.3.5. Ściskanie metali kruchych	42
3.3.6. Przeprowadzenie próby	44
3.3.7. Przygotowanie raportu z badań	44
3.4. Badanie udarności metali	44
3.4.1. Wprowadzenie	44
3.4.2. Próbkki do badań	45
3.4.3. Młot wahadłowy stosowany do przeprowadzenia próby udarności	45

3.4.4.	Metoda badania	46
3.4.5.	Analiza i zapis wyników pomiaru	46
3.4.6.	Określenie temperatury kruchości	47
3.4.7.	Przygotowanie raportu z badań	48
3.5.	Dynamiczna próba rozciągania metali	49
3.5.1.	Wprowadzenie	49
3.5.2.	Próbki i urządzenie do rozciągania dynamicznego	49
3.5.3.	Naprężenia i odkształcenia przy rozciąganiu dynamicznym	50
3.5.4.	Wpływ karbu	51
3.5.5.	Przygotowanie raportu z badań	52
3.6.	Statyczna próba skręcania metali	52
3.6.1.	Wprowadzenie	52
3.6.2.	Próba skręcania metali	54
3.6.3.	Obliczanie wartości charakterystycznych	56
3.6.4.	Próbki do próby skręcania	59
3.6.5.	Przeprowadzenie próby	59
3.6.6.	Wyznaczenie modułu sprężystości postaciowej	61
3.6.7.	Przygotowanie raportu z badań	62
3.7.	Badanie odkształcenia za pomocą tensometrii oporowej	62
3.7.1.	Podstawy teoretyczne	62
3.7.2.	Układy pomiarowe	67
3.7.3.	Badanie płaskiego stanu naprężeń	69
3.7.4.	Przygotowanie raportu z badań	72
3.8.	Badanie twardości metali	73
3.8.1.	Wstęp	73
3.8.2.	Pomiar twardości sposobem Brinella	73
3.8.3.	Pomiar twardości sposobem Rockwella	76
3.8.4.	Pomiar twardości sposobem Vickersa	81
3.8.5.	Pomiar twardości młotkiem Poldi	83
3.8.6.	Pomiar twardości metodą Shore'a	84
3.8.7.	Przygotowanie raportu z badań	86
3.9.	Badanie wytrzymałości zmęczeniowej metali	86
3.9.1.	Wstęp	86
3.9.2.	Podstawy	86
3.9.3.	Wyznaczanie wytrzymałości zmęczeniowej (wykres Wöhlera – krzywa S–N materiału)	89
3.9.4.	Wyznaczanie wytrzymałości zmęczeniowej przy cyklach niesymetrycznych (wykres Smitha, wykres Haigha)	90
3.9.5.	Zjawiska wpływające na zmęczenie materiału	93
3.9.6.	Przygotowanie raportu z badań	96

3.10. Badanie lin stalowych	97
3.10.1. Budowa lin	97
3.10.2. Klasyfikacja lin stalowych	98
3.10.3. Badanie lin stalowych	100
3.10.4. Zawiesia	104
3.10.5. Przykłady oznaczeń i konstrukcji lin	105
3.10.6. Przygotowanie raportu z badań	106
3.11. Próby technologiczne – część 1	106
3.11.1. Cel próby	106
3.11.2. Wprowadzenie	107
3.11.3. Próba jednokierunkowego skręcania drutu	111
3.11.4. Próba przeginania dwukierunkowego drutu metalowego oraz blach i taśm o grubości do 3 mm	112
3.11.5. Próba spęczania metali	114
3.11.6. Próba podwójnego zginania i próba zawijania ze zginaniem cienkich blach metalowych	116
3.11.7. Przygotowanie raportu z badań	117
3.12. Próby technologiczne – część 2	118
3.12.1. Cel próby	118
3.12.2. Próba rozciągania pierścienia wyciętego z rury metalowej	119
3.12.3. Próba rozłaczania rury metalowej	119
3.12.4. Próba rozłaczania pierścienia wyciętego z rury metalowej	121
3.12.5. Próba spłaszczania rury metalowej	122
3.12.6. Gięcie plastyczne	123
3.12.7. Próba zginania rury metalowej	124
3.12.8. Próby tłoczności	125
3.12.9. Przygotowanie raportu z badań	126
3.13. Badanie złączy spawanych metali	128
3.13.1. Wstęp	128
3.13.2. Statyczna próba rozciągania doczołowych złączy spawanych metali ...	129
3.13.3. Statyczna próba rozciągania próbek poprzecznych spawanych złączy metali	130
3.13.4. Statyczna próba rozciągania próbek wzdłużnych ze spoin złączy spawanych metali	130
3.13.5. Próba udarowości spawanych złączy metali	131
3.13.6. Próba zginania spawanych złączy metali	132
3.13.7. Przygotowanie raportu z badań	136
3.14. Wybrane aspekty mechaniki pękania	138
3.14.1. Wstęp	138
3.14.2. Wyznaczenie odporności na pęknięcie w płaskim stanie odkształcenia ...	142

3.14.3. Wyznaczanie prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego	145
3.14.4. Przygotowanie raportu z badań	150
3.15. Próba udarowa spadającym ciężarem	152
3.15.1. Cel próby	152
3.15.2. Wykonanie próby	152
3.15.3. Przygotowanie raportu z badań	155
3.16. Statyczna próba rozciągania metali w podwyższonej temperaturze.	
Zjawisko pełzania	156
3.16.1. Cel próby	156
3.16.2. Statyczna próba rozciągania w podwyższonej temperaturze	156
3.16.3. Zjawisko pełzania metali	157
3.16.4. Próba pełzania metali	160
3.16.5. Uwagi końcowe	162
3.16.6. Przygotowanie raportu z badań	163
4. Literatura	165

1. Wstęp

Niniejszy podręcznik jest przeznaczony dla studentów studiów inżynierskich (studia pierwszego stopnia) Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej, w ramach przedmiotu *wytrzymałość materiałów*, na wszystkich kierunkach studiów prowadzonych na Wydziale: *mechanika i budowa maszyn, mechatronika, inżynieria mechaniczno-medyczna, zarządzanie i inżynieria produkcji oraz inżynieria materiałowa*. W podręczniku opisano także ćwiczenia laboratoryjne dla studentów studiów magisterskich na kierunku *mechanika i budowa maszyn* w ramach przedmiotu *mechanika ośrodków ciągłych*.

W podręczniku zawarto opis Laboratorium Wytrzymałości Materiałów znajdującego się w Katedrze Mechaniki i Mechatroniki na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej oraz instrukcje do szesnastu ćwiczeń laboratoryjnych dla studentów wszystkich kierunków studiów oferowanych na Wydziale. Ćwiczenia dotyczą zagadnień związanych ze statycznymi i dynamicznymi próbami niszczącymi, badań materiałów na ściskanie i rozciąganie, badań twardości, udarność, wytrzymałości zmęczeniowej i propagacji pęknięcia zmęczeniowego oraz badań lin stalowych, prób technologicznych i badań niszczących złączy spawanych metali. Są to badania odnoszące się do metali pracujących nie tylko w temperaturze otoczenia, ale także w podwyższonej temperaturze.

W opisach poszczególnych ćwiczeń podano cel prowadzonych badań, podstawowe definicje, metody realizacji badań ze szczególnym omówieniem próbek do badań, maszyn i urządzeń wytrzymałościowych niezbędnych do realizacji badań oraz sposobu analizy i opracowywania wyników. Podano również wykaz polskich i europejskich norm, według których prowadzone są badania.

W podręczniku wykorzystane zostały fragmenty instrukcji laboratoryjnych opracowanych przez doktorów: Stefana Sawiaka, Marka Gontarczyka, Henryka Potulskiego, Jerzego Stuczynskiego, Macieja Kahsina oraz Henryka Olszewskiego.

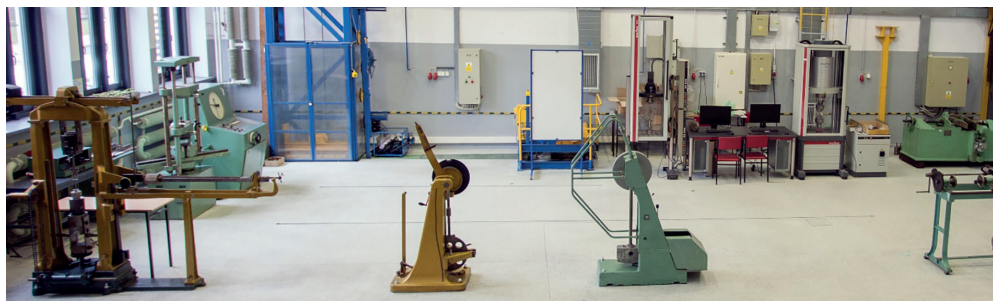
W zamyśle autorów wiedza zawarta w niniejszym podręczniku ma być pomocna nie tylko w realizacji ćwiczeń laboratoryjnych wykonywanych w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Katedry Mechaniki i Mechatroniki, ale także – co niezwykle istotne – w lepszym

zrozumieniu teorii wykładanej podczas studiów oraz w uzyskaniu niezbędnych kompetencji potrzebnych do wykonywania zawodu w szeroko pojętym obszarze mechaniki.

Wiktoria Wojnicz, Edmund Wittbrodt

2. Laboratorium wytrzymałości materiałów na Wydziale Mechanicznym PG

W Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej (rys. 2.1) znajdują się maszyny i urządzenia do realizacji prób statycznych rozciągania i ściskania metali w temperaturze otoczenia oraz w podwyższonej temperaturze, prób udarowych, badań odkształceń metodą tensometrii oporowej, badań propagacji pęknięcia zmęczeniowego, prób technologicznych metali, a także badań złączy spawanych. Maszyny te posiadają w większości ważne świadectwa wzorcowania, wydane przez Okręgowy Urząd Miar.

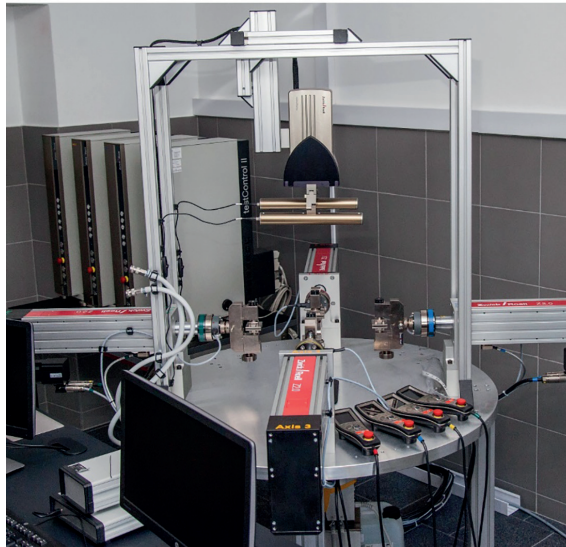


Rys. 2.1. Hala Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej

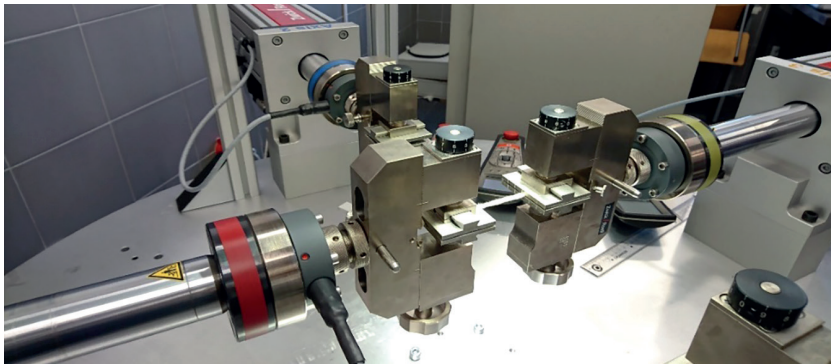
Do dyspozycji wykonujących badania na hali znajdują się następujące maszyny i urządzenia wytrzymałościowe:

- maszyna wytrzymałościowa ZWICK BIAXIAL 4×EZ002 (4×2kN) (rys. 2.2–2.4);
- maszyna wytrzymałościowa osiowo-skrętna ZWICK Z010TE (10 kN i 20 Nm) (rys. 2.5);
- maszyna wytrzymałościowa do badań zmęczeniowych ZWICK LTM10 (10 kN) (rys. 2.6);
- maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8503 (500 kN) (rys. 2.7);
- maszyna wytrzymałościowa typu wagowego LOSENHAUSEN (50 kN) (rys. 2.8);
- młot wahadłowy typu Charpy’ego VEB (300 J) (rys. 2.9);
- młot spadowy J. AMSLER-LAFFON & SOHN (rys. 2.10);

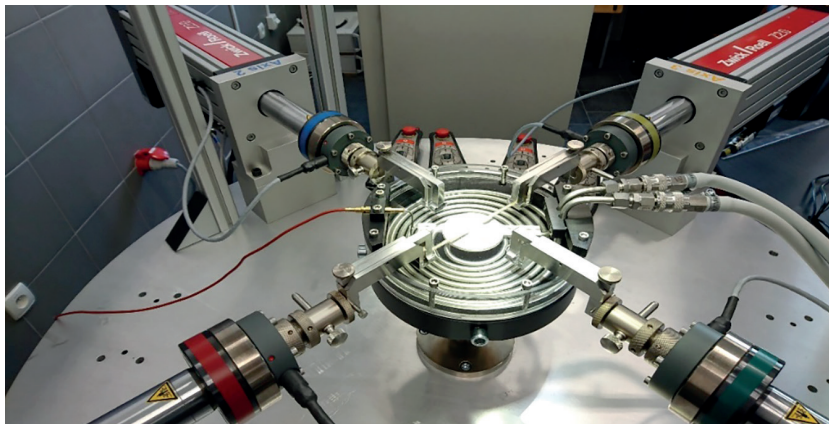
- młot uniwersalny MOHR & FEDERHAFF (300 J) (rys. 2.11);
- dynamiczna maszyna wytrzymałościowa do badań zmęczeniowych SCHENCK (rys. 2.12);
- skrzętkarka ALFRED J. AMSLER & CO. (rys. 2.13);
- maszyna wytrzymałościowa ZD20 (rys. 2.14);
- maszyna wytrzymałościowa ZD100PU (rys. 2.15);
- cyfrowy zestaw do pomiarów tensometrycznych CL 363 (ZEPWN) (rys. 2.16);
- cyfrowy zestaw do pomiaru siły ZEPWN (miernik CL 361A i czujniki siły CL 14 \pm 100 kN, \pm 10 kN) (rys. 2.17);
- cyfrowy zestaw do pomiarów temperatury CL 323 ZEPWN (zakres I: 0÷600°C; zakres II: -150÷50°C) (rys. 2.18).



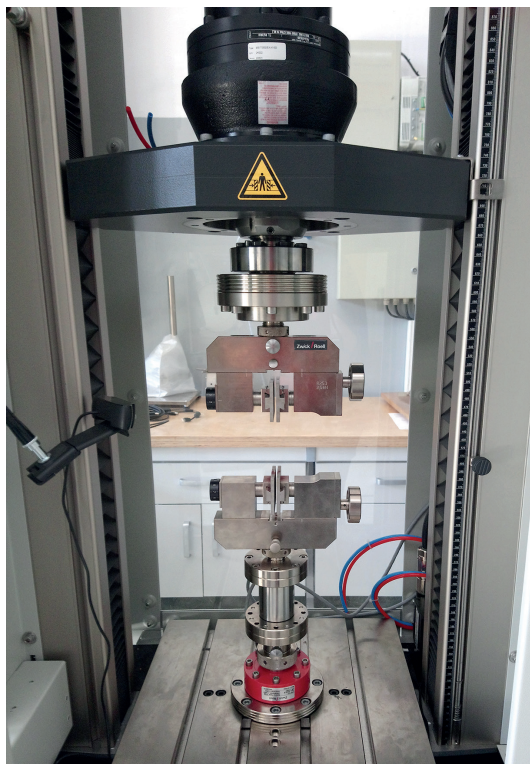
Rys. 2.2. Maszyna wytrzymałościowa ZWICK BIAxIAL 4xEZ002 (4×2 kN)



Rys. 2.3. Przestrzeń robocza maszyny wytrzymałościowej ZWICK BIAxIAL 4xEZ002 (4×2 kN)



Rys. 2.4. Przestrzeń robocza maszyny wytrzymałościowej ZWICK BIAxIAL 4xEZ002 (4x2 kN) z zainstalowanym zbiornikiem do badań w płynie fizjologicznym w zakresie temperatur 10÷40 C°



Rys. 2.5. Maszyna wytrzymałościowa osiowo-skrętna ZWICK Z010TE (10 kN i 20 Nm)



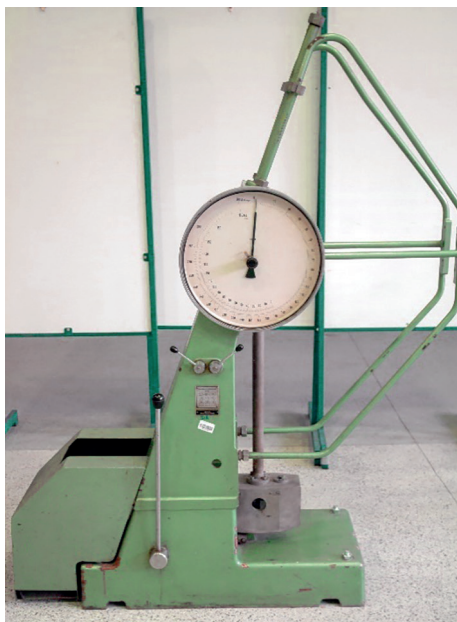
Rys. 2.6. Maszyna wytrzymałościowa do badań zmęczeniowych ZWICK LTM10 (10 kN)



Rys. 2.7. Maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8503 (500 kN)



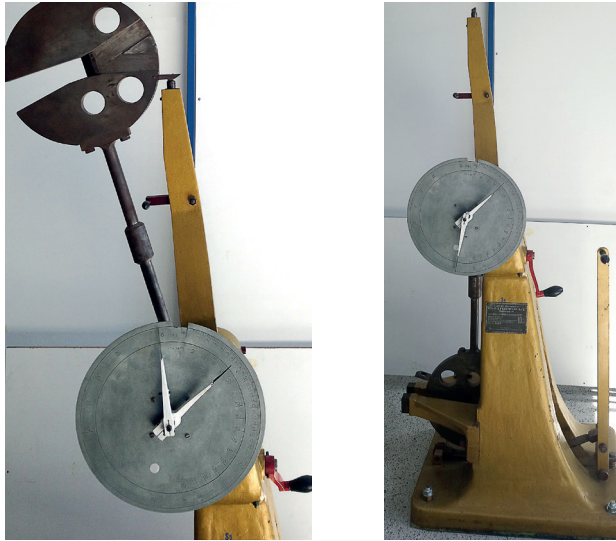
Rys. 2.8. Maszyna wytrzymałościowa typu wagowego LOSENHAUSEN (50 kN)



Rys. 2.9. Młot wahadłowy typu Charpy'ego VEB (300 J)



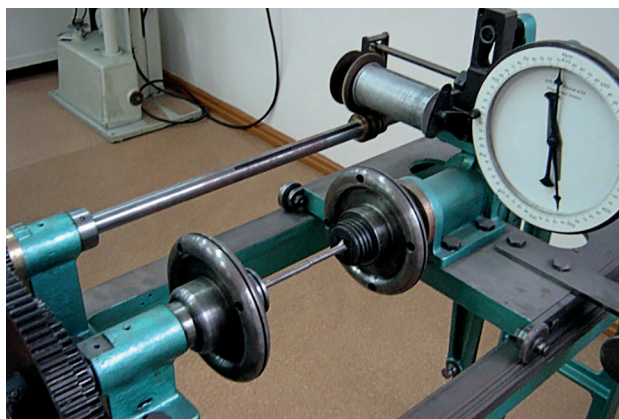
Rys. 2.10. Młot spadowy J. AMSLER-LAFFON & SOHN



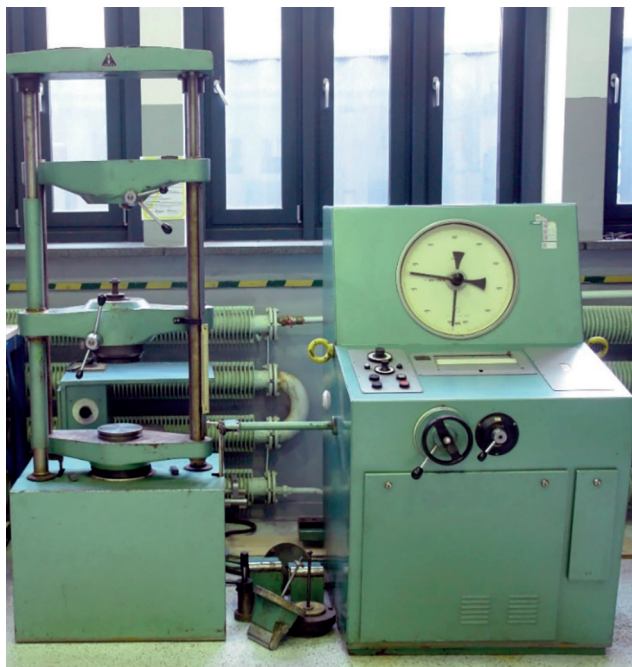
Rys. 2.11. Młot uniwersalny MOHR & FEDERHAFF (300 J)



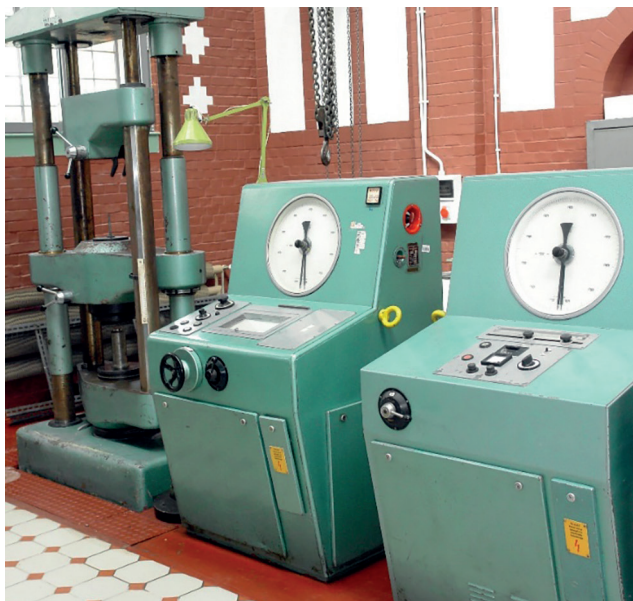
Rys. 2.12. Dynamiczna maszyna wytrzymałościowa do badań zmęczeniowych SCHENCK



Rys. 2.13. Skręcarka ALFRED J. AMSLER & CO.



Rys. 2.14. Maszyna wytrzymałościowa ZD20



Rys. 2.15. Maszyna wytrzymałościowa ZD100PU



Rys. 2.16. Cyfrowy zestaw do pomiarów tensometrycznych CL 363 (ZEPWN)



Rys. 2.17. Cyfrowy zestaw do pomiaru siły ZEPWN: 1 – miernik mikroprocesorowy CL 361A, 2 – czujnik siły CL 14 o zakresie ± 100 kN, 3 – czujnik siły CL 14 o zakresie ± 10 kN



Rys. 2.18. Cyfrowy zestaw do pomiarów temperatury CL 323 ZEPWN (zakres I: $0 \div 600^\circ\text{C}$; zakres II: $-150 \div 50^\circ\text{C}$)

W ramach realizowanych ćwiczeń laboratoryjnych badania mechaniczne są realizowane na następujących maszynach/stanowiskach:

1. Statyczna próba rozciągania metali: maszyna wytrzymałościowa ZWICK BIAxIAL 4×EZ002, maszyna wytrzymałościowa osiowo-skrętna ZWICK Z010TE, maszyna wy-

- trzymałościowa INSTRON 8503, maszyna wytrzymałościowa ZD20, maszyna wytrzymałościowa ZD100PU, cyfrowy zestaw do pomiaru siły ZEPWN.
2. Wyznaczanie modułu sprężystości podłużnej, umownej granicy sprężystości i umownej granicy plastyczności: maszyna wytrzymałościowa ZWICK BIAXIAL 4×EZ002, maszyna wytrzymałościowa typu wagowego LOSENHAUSEN (50 kN), cyfrowy zestaw do pomiaru siły ZEPWN.
 3. Statyczna próba ściskania metali: maszyna wytrzymałościowa ZWICK BIAXIAL 4×EZ002, maszyna wytrzymałościowa osiowo-skrętna ZWICK Z010TE, maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8503, maszyna wytrzymałościowa ZD20, maszyna wytrzymałościowa ZD100PU, cyfrowy zestaw do pomiaru siły ZEPWN.
 4. Badanie udarności metali: młot wahadłowy typu Charpy'ego VEB (300 J).
 5. Dynamiczna próba rozciągania próbek z karbem i bez karbu: młot uniwersalny MOHR & FEDERHAFF (300 J).
 6. Statyczna próba skręcania metali: maszyna wytrzymałościowa osiowo-skrętna ZWICK Z010TE, skrzęcarka ALFRED J. AMSLER & CO.
 7. Tensometria elektrooporowa: maszyna wytrzymałościowa ZD20, maszyna wytrzymałościowa osiowo-skrętna ZWICK Z010TE, cyfrowy zestaw do pomiarów tensometrycznych CL 363 (ZEPWN).
 8. Badanie twardości metali: twardościomierze dydaktyczne.
 9. Badanie wytrzymałości zmęczeniowej metali: maszyna wytrzymałościowa do badań zmęczeniowych ZWICK LTM10, dynamiczna maszyna wytrzymałościowa do badań zmęczeniowych SCHENCK.
 10. Badanie lin stalowych: maszyna wytrzymałościowa ZWICK BIAXIAL 4×EZ002, maszyna wytrzymałościowa osiowo-skrętna ZWICK Z010TE.
 11. Próby technologiczne: skrzęcarka ręczna, urządzenie do przeginania, maszyna wytrzymałościowa ZD20.
 12. Badanie złączy spawanych metali: maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8503, maszyna wytrzymałościowa ZD20, maszyna wytrzymałościowa ZD100PU.
 13. Wybrane aspekty mechaniki pęknięcia, wyznaczenie współczynnika intensywności naprężenia w płaskim stanie naprężenia, propagacja pęknięcia zmęczeniowego: maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8503, dynamiczna maszyna wytrzymałościowa do badań zmęczeniowych SCHENCK.
 14. Próba udarowa spadającym ciężarem (DWTT): młot spadowy J. AMSLER-LAFFON & SOHN.
 15. Statyczna próba rozciągania metali w podwyższonej temperaturze, zjawisko pełzania: maszyna wytrzymałościowa ZD20, cyfrowy zestaw do pomiarów temperatury CL 323 ZEPWN.

3. Ćwiczenia laboratoryjne

3.1. Statyczna próba rozciągania metali

3.1.1. Cel badań

Celem statycznej próby rozciągania badanego metalu jest oszacowanie właściwości wytrzymałościowych (np. górnej granicy plastyczności R_{eH} , dolnej granicy plastyczności R_{eL} , wytrzymałości na rozciąganie R_m) oraz właściwości technologicznych (np. wydłużenia procentowego po rozerwaniu A i przewężenia procentowego Z) [6, 7, 22, 68]. Można także wyznaczyć inne właściwości mechaniczne, które są opisane w normie PN-EN ISO 6892-1: 2010 [58], takie jak: umowna granica plastyczności przy wydłużeniu trwałym R_p , umowna granica plastyczności przy wydłużeniu nieproporcjonalnym $R_{p0.2}$, umowna granica plastyczności przy wydłużeniu całkowitym R_i , wydłużenie całkowite procentowe po rozerwaniu A_t , wydłużenie nieproporcjonalne procentowe przy największej sile $A_{g0.2}$, wydłużenie całkowite procentowe przy największej sile $A_{g0.5}$. Statyczną próbę rozciągania metali przeprowadza się w temperaturze pokojowej w zakresie od 10°C do 35°C, w warunkach kontrolowanych zaś zakres ten wynosi od 18°C do 28°C.

3.1.2. Podstawowe pojęcia

Własności mechaniczne – są to cechy określające wytrzymałość materiału konstrukcyjnego na działania różnorodnych obciążeń zewnętrznych. Na własności mechaniczne składają się *własności wytrzymałościowe* i *własności technologiczne (plastyczne)*.

Własności wytrzymałościowe – są to cechy badanego materiału uzyskiwane podczas przeprowadzania prób wytrzymałościowych, w których wymagane jest ilościowe oszacowanie działania obciążeń zewnętrznych.

Własności technologiczne (plastyczne) – są to cechy badanego materiału uzyskiwane podczas przeprowadzania prób technologicznych, z których wyznacza się podatność materiału na określone odkształcenia trwałe. W próbach technologicznych nie przeprowadza się ilościowo-

wego oszacowania działania obciążenia zewnętrznego wywołującego odkształcenia trwałe badanego materiału.

Własności wytrzymałościowe

Wyraźna granica plastyczności – jest to naprężenie, które odpowiada sile powodującej przyrost odkształcenia plastycznego próbki bez wzrostu tej siły.

Górna granica plastyczności (R_{eH}) – jest to naprężenie obliczane jako stosunek największej siły występującej w próbce (przed jej pierwszym spadkiem podczas badania) do początkowego pola przekroju poprzecznego części równoległej próbki badanej S_0 .

Dolna granica plastyczności (R_{eL}) – jest to naprężenie obliczane jako stosunek najmniejszej siły, która występuje w próbce podczas okresu płynięcia z pominięciem ewentualnego efektu przejściowego, do początkowego pola przekroju poprzecznego części równoległej próbki badanej S_0 .

Umowna granica plastyczności przy wydłużeniu nieproporcjonalnym (R_p) – jest to naprężenie wyznaczone w czasie wydłużenia nieproporcjonalnego (gdy zależność między naprężeniem a wydłużeniem próbki jest nieliniowa) przy założonym procentowym wydłużeniu długości pomiarowej próbki badanej. Symbol umownej granicy plastyczności przy wydłużeniu nieproporcjonalnym musi zawierać indeks określający założone procentowe wydłużenie długości pomiarowej próbki do badań. Na przykład R_{pa} oznacza, że osiągnięcie umownej granicy plastyczności przy wydłużeniu nieproporcjonalnym następuje wtedy, gdy wydłużenie procentowe długości pomiarowej próbki wyniesie pa jej początkowej długości l_0 .

Umowna granica plastyczności przy wydłużeniu całkowitym (R_t) – jest to naprężenie wyznaczone przy zadanym procentowym wydłużeniu całkowitym (będącym sumą wydłużenia sprężystego i trwałego). Symbol umownej granicy plastyczności przy wydłużeniu całkowitym musi zawierać indeks określający procentowe wydłużenie długości pomiarowej badanej próbki. Na przykład R_{tb} oznacza, że osiągnięcie umownej granicy plastyczności przy wydłużeniu całkowitym następuje wtedy, gdy przyrost długości pomiarowej próbki wyniesie b jej długości początkowej l_0 .

Umowna granica plastyczności przy wydłużeniu trwałym (R_r) – jest to naprężenie, które odpowiada sile powodującej trwały przyrost początkowej długości pomiarowej badanej próbki l_0 . Symbol umownej granicy plastyczności przy wydłużeniu trwałym musi zawierać indeks określający procentowy przyrost początkowej długości pomiarowej badanej próbki l_0 . Na przykład R_{rc} oznacza, że osiągnięcie umownej granicy plastyczności następuje wtedy, gdy trwały przyrost długości próbki wyniesie c jej początkowej długości l_0 .

Wytrzymałość na rozciąganie (R_m) – jest to naprężenie obliczane jako stosunek największej siły F_m występującej w próbce podczas badania do początkowego pola przekroju poprzecznego S_0 części równoległej tej próbki.

Własności technologiczne

Wydlużenie – jest to przyrost początkowej długości pomiarowej l_0 w dowolnej chwili przeprowadzenia próby.

Wydlużenie jednostkowe (ε) – jest to bezwymiarowy stosunek wydłużenia badanej próbki do jej początkowej długości pomiarowej l_0 .

Wydlużenie jednostkowe procentowe, zwane w skrócie *wydłużeniem procentowym* (również oznaczane jako ε) – jest to wyrażony w procentach stosunek wydłużenia badanej próbki do jej początkowej długości pomiarowej l_0 .

Wydlużenie sprężyste procentowe (ε_{sp}) – jest to wyrażony w procentach stosunek sprężystego wydłużenia badanej próbki, które znika po jej całkowitym odciążeniu, do początkowej długości pomiarowej l_0 tej próbki.

Wydlużenie trwałe (plastyczne) procentowe (ε_{pl}) – jest to wyrażony w procentach stosunek trwałego wydłużenia badanej próbki, które zostaje po jej całkowitym odciążeniu, do początkowej długości pomiarowej l_0 tej próbki.

Wydlużenie procentowe po rozerwaniu (A) – jest to wyrażony w procentach stosunek trwałego wydłużenia długości pomiarowej próbki po rozerwaniu ($l_u - l_0$) do jej początkowej długości pomiarowej l_0 .

Wydlużenie całkowite procentowe po rozerwaniu (A_t) – jest to wyrażony w procentach stosunek wydłużenia całkowitego (na które składa się wydłużenie trwałe i sprężyste) po rozerwaniu do początkowej długości pomiarowej próbki badanej l_0 .

Wydlużenie nieproporcjonalne procentowe przy największej sile (A_g) – jest to wyrażony w procentach stosunek trwałego wydłużenia długości pomiarowej próbki przy największej sile (odpowiadającej wytrzymałości na rozciąganie R_m) do jej początkowej długości pomiarowej l_0 .

Wydlużenie całkowite procentowe przy największej sile (A_{gt}) – jest to wyrażony w procentach stosunek całkowitego wydłużenia długości pomiarowej próbki przy największej sile (odpowiadającej wytrzymałości na rozciąganie R_m) do jej początkowej długości pomiarowej l_0 .

Przewężenie procentowe przekroju (Z) – jest to wyrażony w procentach stosunek największej zmiany pola przekroju poprzecznego części równoległej próbki badanej ($S_u - S_0$) do początkowego pola przekroju poprzecznego części równoległej tej próbki S_0 , gdzie S_u jest najmniejszym polem przekroju poprzecznego części równoległej próbki badanej po jej rozerwaniu.

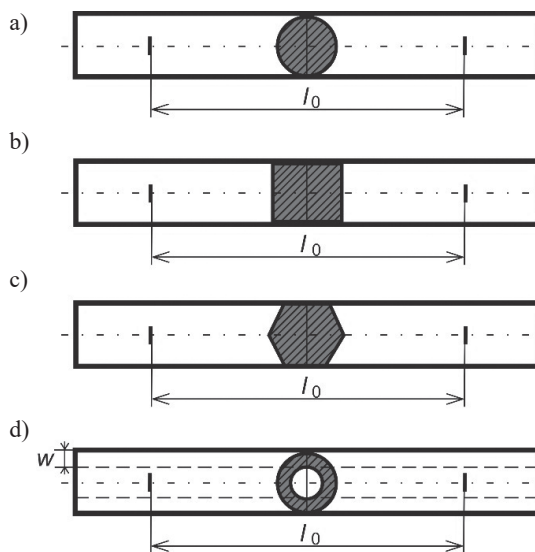
Próbki do badań

Próbka do badań – jest to odpowiednio przygotowany element do badań (rys. 3.1).

Część pomiarowa próbki – jest to część próbki, na której przeprowadza się pomiar wydłużenia próbki.

Część uchwytowa próbki – jest to część próbki przeznaczona do mocowania w uchwycie maszyny wytrzymałościowej.

Długość całkowita próbki (l_t) – jest to długość pomiędzy przeciwległymi końcami próbki.



Rys. 3.1. Próbkę do badań nieobrobione mechanicznie o przekroju: a) okrągłym; b) prostokątnym; c) wielokątnym; d) pierścieniowym (w – grubość rury)

Długość pomiarowa (l) – jest to długość cylindrycznej lub pryzmatycznej (tzn. długość o niezmiennym przekroju) części próbki do badań, na której przeprowadza się pomiar wydłużenia. Długość ta jest odległością pomiędzy skrajnymi rysami na próbce.

Początkowa długość pomiarowa (l_0) – jest to długość pomiarowa przed przyłożeniem siły.

Końcowa długość pomiarowa (l_u) – jest to długość pomiarowa po rozerwaniu się badanej próbki.

Długość części równoległej (l_c) – jest to długość równoległej części próbki do badań obrobionej mechanicznie, która posiada pomniejszony przekrój poprzeczny w porównaniu z częścią uchwytową. W przypadku próbek nieobrobionych mechanicznie długość ta odpowiada odległości pomiędzy uchwytami maszyny wytrzymałościowej.

Próbka nieproporcjonalna do badań – jest to próbka, której początkowa długość pomiarowa l_0 nie zależy od początkowego pola przekroju poprzecznego części równoległej próbki S_0 . Wymagane jest, aby symbol wydłużenia procentowego po rozerwaniu takiej próbki zawierał indeks wskazujący początkową długość pomiarową w milimetrach, np. $A_{\text{długość mm}}$.

Próbka proporcjonalna do badań – jest to próbka, której początkowa długość pomiarowa l_0 zależy od początkowego pola przekroju poprzecznego części równoległej próbki S_0 , np.:

- 1) dla próbki 5-krotnej $l_0 = 5 \sqrt{\frac{4S_0}{\pi}} = 5,65\sqrt{S_0}$, ponadto wymagane jest, aby wydłużenie procentowe po rozerwaniu było oznaczone symbolem A ;
- 2) dla próbki 10-krotnej $l_0 = 10 \sqrt{\frac{4S_0}{\pi}} = 11,3\sqrt{S_0}$, ponadto wymagane jest, aby wydłużenie procentowe po rozerwaniu było oznaczone symbolem A z indeksem 11,3, tzn. $A_{11,3}$.

Rozerwanie się próbki – jest to utrata spójności materiału badanej próbki.

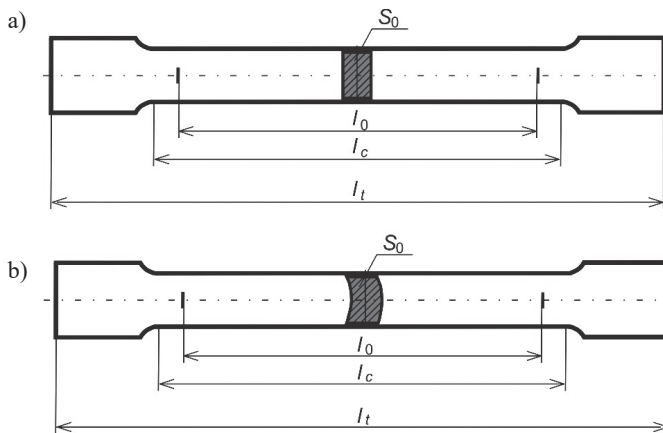
3.1.3. Wykonanie badań

Przygotowanie próbek do badań

Próbki do badań są pobierane i przygotowywane według norm przedmiotowych. Jeżeli próbka do badań jest wycinana sposobem termicznym (np. palnikiem acetylenowym), to należy przewidzieć odpowiednie naddatki materiału próbki na obróbkę mechaniczną, która pozwala zlikwidować strefy przegrzane. Wtedy końcowa obróbka takiej próbki powinna zostać wykonana wyłącznie metodami skrawania i szlifowania.

Próbki z blach powinny być wycinane tak, aby rozciąganie zachodziło w kierunku zgodnym z kierunkiem walcowania lub prostopadle do niego.

Do badań są używane zarówno próbki nieobrobione mechanicznie (rys. 3.1), jak i próbki obrobione mechanicznie (rys. 3.2). Próbki o niezmiennym przekroju poprzecznym (np. próbki z żeliwa lub innych metali, druty, pręty itp.) można badać bez uprzedniej obróbki mechanicznej. Z kolei próbki pobrane z odcinka wyrobu hutniczego, który został odlany lub wycięty na prasie, należy poddać obróbce mechanicznej.



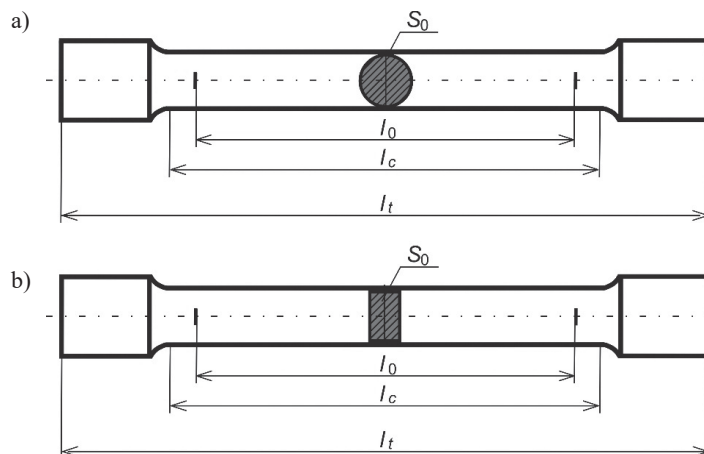
Rys. 3.2. Próbki do badań obrobione mechanicznie o przekroju: a) prostokątnym; b) krzywoliniowym (wycinek rury)

Próbka obrobiona mechanicznie lub próbka odlana, która nie została obrobiona mechanicznie, powinna posiadać łagodne przejście pomiędzy jej częścią pomiarową i uchwytołą, promień przejścia zaś powinien być zgodny z wytycznymi specyfikacji (normy) badanego materiału. Kształt części uchwytołej próbki powinien być dopasowany do uchwytów maszyny wytrzymałościowej.

Dla próbek obrobionych mechanicznie, które nie mają strefy przejścia, oraz próbek nieobrobionych mechanicznie długość części równoległej l_c musi być większa od początkowej długości pomiarowej l_0 .

Do badań są wykorzystywane zarówno próbki proporcjonalne (rys. 3.3), jak i próbki nieproporcjonalne. Przekrój poprzeczny tych próbek może być okrągły (druty, pręty), kwa-

dratowy i prostokątny (blachy, płyty, płaskowniki) lub pierścieniowy (rury). W niektórych przypadkach ze względu na rodzaj wyrobu hutniczego przekrój poprzeczny próbki może posiadać inny kształt.



Rys. 3.3. Próbkki do badań proporcjonalne o przekroju: a) okrągłym; b) prostokątnym

Należy zadbać o to, aby początkowa długość pomiarowa próbki nie była mniejsza niż 15 mm oraz aby dopuszczalne tolerancje wymiarów i kształtów próbek do badań były zgodne z wymaganiami podanymi w załącznikach B÷E normy [58].

Próbka do badań z rury może być: 1) odcinkiem rury albo paskiem wyciętym wzdłuż lub w poprzek jej ścianki o pełnej grubości; 2) wykonana ze ścianki rury przez obróbkę mechaniczną i posiadać okrągły przekrój poprzeczny. Sposób pobrania próbki do badań jest określony w normie wyrobu rury. Przy tym należy zachować ostrożność podczas prostowania próbek poprzecznych. Próbkę należy wykonać według wymagań podanych w załączniku E normy [58].

Maszyna wytrzymałościowa

Maszyna wytrzymałościowa wykorzystywana do przeprowadzenia statycznej próby rozciągania powinna zapewnić [61]:

- 1) jednoosiowe obciążenie próbki (oś działania siły powinna się pokrywać z osią próbki badanej);
- 2) ciągły wzrost obciążenia w sposób jednostajny, bez skoków i wstrząsów, z możliwością płynnej regulacji szybkości przyrostu naprężenia;
- 3) utrzymanie stałego obciążenia w czasie nie krótszym niż 30 s;
- 4) pomiar z dokładnością nie mniejszą niż klasa 1.

Przygotowania do przeprowadzania próby

Przed przystąpieniem do przeprowadzania statycznej próby rozciągania należy wykonać następujące czynności:

- 1) znakowanie początkowej długości pomiarowej l_0 z dokładnością $\pm 1\%$ za pomocą markera lub pisaka;
- 2) określenie początkowego pola przekroju poprzecznego próbki S_0 na podstawie pomiarów jej charakterystycznych wielkości, między innymi:
 - a) dla próbki o przekroju okrągłym początkowe pole przekroju poprzecznego S_0 można obliczyć na podstawie średniej arytmetycznej pomiarów średnicy, którą otrzymano z pomiarów przeprowadzonych w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach w co najmniej trzech miejscach na długości pomiarowej próbki;
 - b) dla próbki z cienkiego wyrobu płaskiego (blachy, taśmy, płaskownika) o grubości zawartej w przedziale $[0,1; 3]$ mm początkowe pole przekroju poprzecznego S_0 należy określić z dokładnością $\pm 2\%$, przy czym błąd pomiaru szerokości próbki nie może przekroczyć $\pm 0,2\%$;
 - c) dla próbki wykonanej z drutu/pręta/kształtownika o średnicy/grubości mniejszej niż 4 mm początkowe pole przekroju poprzecznego próbki S_0 należy wyznaczyć z dokładnością $\pm 1\%$ (dla przekrojów okrągłych należy zastosować metodę opisaną w podpunkcie a); ponadto dla odcinków wyrobów o znanej długości, gęstości i masie początkowe pole przekroju poprzecznego próbki S_0 może być wyznaczone jako iloraz masy i iloczynu gęstości oraz długości wyrobu;
 - d) dla próbki wykonanej z wyrobu płaskiego o grubości równej lub większej niż 3 mm lub z drutu/pręta/kształtownika o średnicy/grubości równej lub większej niż 4 mm początkowe pole przekroju poprzecznego próbki S_0 musi być wyznaczone z dokładnością do $\pm 0,5\%$;
 - e) dla próbki wykonanej z rury początkowe pole przekroju poprzecznego próbki S_0 należy obliczyć z dokładnością do $\pm 1\%$, zgodnie z wymaganiami podanymi w załączniku E.3 normy [52].

Nie przeprowadza się znakowania długości pomiarowej próbki, która została wykonana z wyrobu hutniczego o charakterystyce sprężysto-kruczej (np. żeliwo), ponieważ długość takiej próbki ulega bardzo małym wydłużeniom – rzędu $1/10$ mm.

Dla próbek proporcjonalnych obliczoną długość pomiarową można zaokrąglić do najbliższej wielokrotności 5 mm przy jednoczesnym dotrzymaniu warunku, że różnica między obliczoną a oznakowaną długością nie będzie większa niż 10%.

Jeżeli długość części równoległej próbki do badań l_c jest znacznie większa od początkowej długości pomiarowej l_0 , to można zaznaczyć kilka nachodzących na siebie długości pomiarowych.

Jeżeli próbka jest odcinkiem nieobrobionego wyrobu hutniczego, to długość całkowita próbki l_t musi być tak duża, aby wszystkie znaki pomiarowe mogły być naniesione w dostatecznie dużym odstępnie od uchwytów maszyny.

Sposób zamocowania próbki do badań

Statyczną próbę rozciągania można przeprowadzić po uprzednim zamocowaniu próbki do badań w uchwytach maszyny wytrzymałościowej (np. w zaciskach hydraulicznych, wkładkach klinowych, szczękach równoległych, uchwytach gwintowanych, uchwytach pierścieniowych dwudzielnych). Sposób zamocowania powinien zapewnić osiowe rozciąganie próbki i uniemożliwić jej zginanie.

Szybkość obciążenia

Podczas badania należy nastawiać prędkość rozciągania (*szybkość obciążenia*) według wytycznych normy, biorąc pod uwagę rodzaj materiału i etap próby (etap sprężysty, etap plastycznego płynięcia, etap umocnienia). Wymaganie to wynika stąd, że właściwości mechaniczne materiału próbki badanej zależą od szybkości, z jaką działa na nią obciążenie zewnętrzne w postaci siły lub momentu. W normie [58] podano dwie metody wyznaczania szybkości obciążenia: a) metoda sterowania szybkością przyrostu odkształcenia; b) metoda sterowania szybkością przyrostu naprężenia.

Metodę sterowania szybkością przyrostu odkształcenia stosuje się, gdy próba rozciągania jest przeprowadzana bez zastosowania ekstensometru. Prędkość przyrostu odkształcenia części równoległej próbki oblicza się jako iloraz prędkości przemieszczenia ruchomego uchwytu maszyny do długości części równoległej próbki l_c .

Metodę sterowania szybkością przyrostu naprężenia stosuje się według wytycznych podanych w tab. 3.1. Podczas płynięcia, tzn. od górnej granicy plastyczności R_{eH} aż do dolnej granicy plastyczności R_{eL} , szybkość odkształcania części równoległej próbki powinna być stała i zawierać się w granicach $0,00025 \div 0,0025 \text{ s}^{-1}$. W przypadku, gdy szybkości odkształcania nie da się dokładnie nastawić, przed rozpoczęciem etapu płynięcia należy nastawić stałą szybkość przyrostu naprężenia.

Tabela 3.1

Szybkość przyrostu naprężenia

Moduł sprężystości materiału [GPa]	Szybkość przyrostu naprężenia [MPa·s ⁻¹]	
	minimum	maksimum
<150 (np.: magnez, aluminium, mosiądz, tytan)	2	20
≥150 (np.: kute żelazo, stal, wolfram, nikiel)	6	60

Dla materiału plastycznego lub kruchego wytrzymałość na rozciąganie R_m powinna być wyznaczana przy utrzymaniu stałej wartości szybkości odkształcenia, która nie powinna przekraczać $0,008 \text{ s}^{-1}$.

Charakterystyka próby rozciągania

Przebieg próby rozciągania jest rejestrowany w postaci wykresu w układzie: siła (F) – wydłużenie (Δl). Należy pamiętać, że wydłużenie Δl jest wielkością narzucaną przez układ regulacji maszyny wytrzymałościowej i dlatego Δl stanowi zmienną niezależną, natomiast siła F jest wielkością wynikową i stanowi miarę oporu materiału na rozciąganie. Postać wykresu siła $F=F(\Delta l)$ zależy od rodzaju badanego materiału. Podczas badania materiału plastycznego można wyróżnić pięć etapów. W początkowym etapie rozciągania siła rozciągająca rośnie proporcjonalnie do wydłużenia (etap 1), aż do osiągnięcia tzw. granicy proporcjonalności $\sigma_H = \frac{F_H}{S_0}$, która jest granicą stosowalności prawa Hooke'a. Nieznacznie powyżej tej granicy znajduje się granica sprężystości $\sigma_{spr} = \frac{F_{spr}}{S_0}$ (na odcinku $\sigma_H - \sigma_{spr}$ charakterystyka materiału jest nieliniowo-sprężysta).

Powyżej σ_H do R_{ch} , tzn. do górnej granicy plastyczności (etap 2), wydłużenie jest w przeważającej części sprężyste, jednak ze stopniowo rosnącym udziałem wydłużenia trwałego. Graficzną interpretację tego zjawiska stanowi stopniowe odchylenie się wykresu rozciągania od linii prostej, przedstawiającej prawo Hooke'a.

Etap 3 wiąże się z płynięciem materiału próbki. Zjawisko to przebiega nierównomiernie w objętości próbki. Płynięcie, z punktu widzenia polikrystalicznej struktury materiału, polega na stopniowym niszczeniu fazy o większej sztywności i przejmowaniu obciążenia przez fazy o mniejszej sztywności. Proces ten sprowadza się do powstawania poślizgów w płaszczyznach usytuowanych pod kątem 45° do osi próbki. Efektem tego są widoczne na powierzchni próbki (polerowanej) grupy linii stanowiących obraz płaszczyzn poślizgów (tzn. próbka „matowieje”). Poślizgi zachodzą przez pewien czas, po którym następuje zahamowanie tego zjawiska, spowodowane umocnieniem materiału.

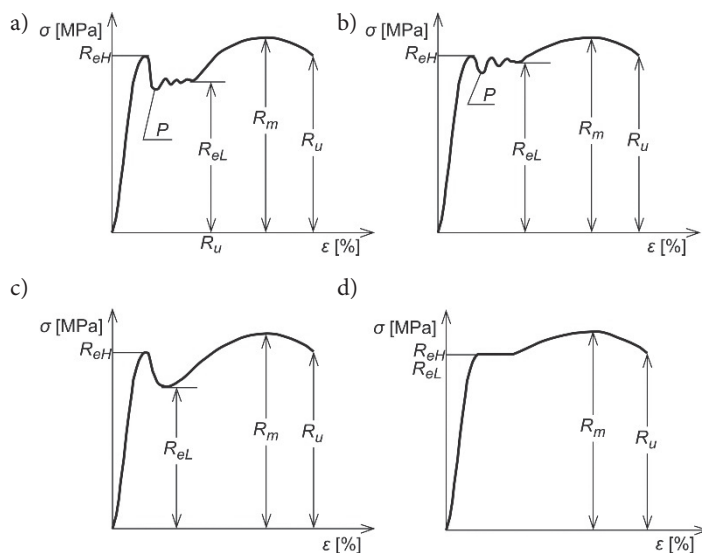
W etapie 4 (od końca płynięcia do siły F_m) w wyniku umocnienia materiału następuje ponowny wzrost obciążenia przy dalszym wydłużaniu próbki. W tym etapie ma miejsce wyraźne odstępstwo od prawa Hooke'a. Występuje tu znaczna przewaga wydłużeń trwałych nad sprężystymi, a tym samym dużemu przyrostowi wydłużenia odpowiada mały przyrost obciążenia.

Przy osiągnięciu maksymalnego obciążenia F_m rozpoczyna się etap 5. Początek tego etapu jest początkiem tworzenia się przewężenia w próbce, tzn. wydłużenia trwale powstają w strefie tworzącej się szyjki, która się zwęża a następnie ulega złamaniu. Powstanie szyjki oznacza przejście z jednoosiowego stanu naprężenia w wieloosiowy stan naprężenia. W materiałach o niskich własnościach plastycznych i materiałach kruchych (stałe stopowe, o dużej zawartości węgla, ulepszone cieplnie, a także żeliwo szare) nie dochodzi do utworzenia szyjki, przy czym odkształcenia trwale są stosunkowo małe i nie uwiadczenia się wyraźna granica plastyczności.

Wyznaczanie własności mechanicznych

Wyznaczanie własności wytrzymałościowych

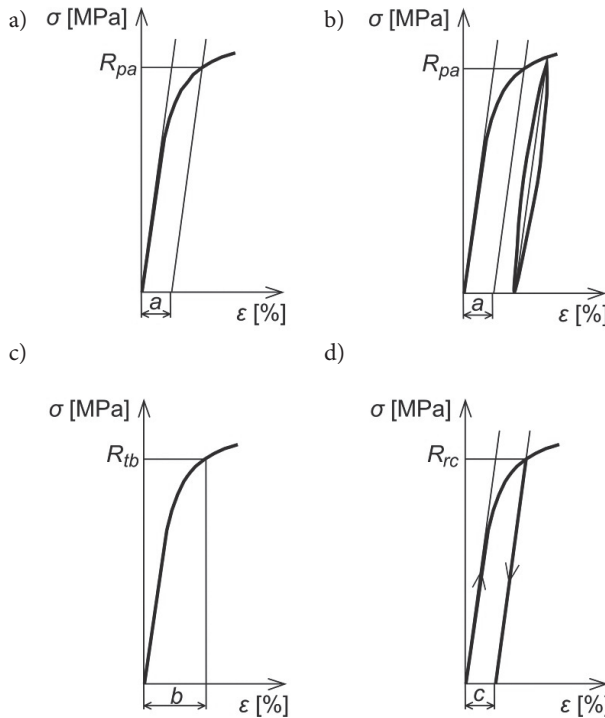
Górną granicę plastyczności R_{eH} , dolną granicę plastyczności R_{eL} i wytrzymałość na rozciąganie R_m należy wyznaczyć na podstawie charakterystyk naprężenie–odkształcenie przy rozciąganiu. Przy wyznaczaniu dolnej granicy plastyczności R_{eL} należy pominąć ewentualny efekt przejściowy P . Cztery różne przypadki tego efektu przedstawiono na rys. 3.4.



Rys. 3.4. Wykresy zależności naprężenie–odkształcenie przy rozciąganiu próbek metalowych dla czterech różnych przypadków

Umowna granica plastyczności przy wydłużeniu nieproporcjonalnym R_p jest wyznaczana z wykresu naprężenie–odkształcenie przy rozciąganiu (rys. 3.5a), na którym trzeba dorysować prostą równoległą do prostoliniowej części krzywej rozciągania w odległości odpowiadającej umownemu procentowemu wydłużeniu trwałemu a (np. $a = 0,2\%$). Wówczas rzędna punktu przecięcia tej prostej z krzywą rozciągania odpowiada naprężeniu umownej granicy plastyczności przy wydłużeniu nieproporcjonalnym R_{pa} .

W przypadku braku początkowego odcinka prostoliniowego na wykresie naprężenie–odkształcenie przy rozciąganiu należy po przekroczeniu przypuszczalnej granicy plastyczności wyznaczyć pętlę histerezy (rys. 3.5b), odciążając i obciążając próbkę ponownie. Wtedy linia środkowa otrzymanej histerezy jest prostą wyznaczającą przebieg odcinka prostoliniowego krzywej rozciągania. Przenosząc tę prostą na odległość równą przyjętemu procentowemu wydłużeniu trwałemu a i wyznaczając punkt jej przecięcia z krzywą rozciągania, otrzymuje się umowną granicę plastyczności przy wydłużeniu nieproporcjonalnym R_{pa} .

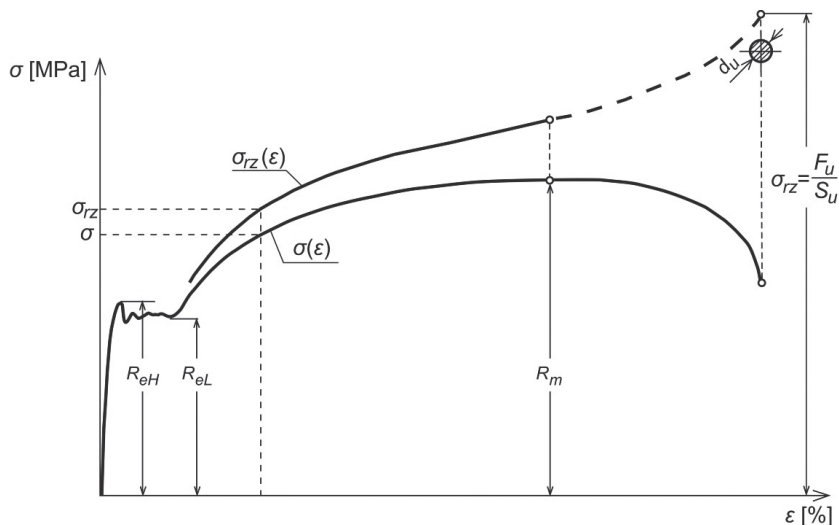


Rys. 3.5. Sposób wyznaczania umownej granicy plastyczności: a, b) przy wydłużeniu nieproporcjonalnym R_{pa} , gdzie a jest zadany procentowym wydłużeniem trwałym; c) przy wydłużeniu całkowitym R_{tb} , gdzie b jest zadany procentowym wydłużeniem całkowitym; d) przy wydłużeniu trwałym R_{rc} , gdzie c jest zadany procentowym wydłużeniem trwałym

Umowna granica plastyczności przy wydłużeniu całkowitym R_t jest wyznaczana z wykresu naprężenie–odkształcenie przy rozciąganiu, na którym trzeba dorysować prostą równoległą do osi rzędnych w odległości odpowiadającej umownemu procentowemu wydłużeniu całkowitemu b (rys. 3.5c). Wówczas rzędna punktu przecięcia tej prostej z krzywą rozciągania odpowiada naprężeniu umownej granicy plastyczności przy wydłużeniu całkowitym R_{tb} .

Umowna granica plastyczności przy wydłużeniu trwałym R_r jest wyznaczana z wykresu naprężenie–odkształcenie przy rozciąganiu w czasie przeprowadzania próby. Wykres ten powinien zawierać wcześniej narysowaną prostą równoległą do prostoliniowej części krzywej rozciągania, która jest umieszczona w odległości odpowiadającej umownemu procentowemu wydłużeniu trwałemu c (rys. 3.5d). Gdy bieżąca krzywa rozciągania przecina uprzednio narysowaną prostą, należy utrzymać obciążenie na stałym poziomie przez $10 \div 12$ s (gdyż ten punkt odpowiada osiągnięciu umownej granicy plastyczności przy wydłużeniu trwałym R_r), a następnie całkowicie odciążyć próbkę. Jeżeli przebieg prostoliniowego odcinka krzywej rozciągania jest rozbieżny z wcześniej wyznaczoną prostą i/lub wyznaczone wydłużenie trwałe nie odpowiada przyjętej wartości, należy przeprowadzić nową próbę.

W celu oceny różnicy pomiędzy wartościami *naprężeń teoretycznych* $\sigma = \frac{F}{S_0}$ i *naprężeń rzeczywistych* $\sigma_{rz} = \frac{F}{S}$, gdzie S – bieżąca wartość przekroju poprzecznego próbki, można sporządzić wykres naprężeń rzeczywistych (rys. 3.6).



Rys. 3.6. Sposób wyznaczania naprężeń rzeczywistych σ_{rz}

Współrzędne są wyznaczone z kolejnych punktów wykresu – najpierw oblicza się pole przekroju S , potem naprężenie teoretyczne $\sigma = \frac{F}{S_0}$ i na końcu naprężenie rzeczywiste $\sigma_{rz} = \frac{F}{S}$. Następnie na wykresie wyznaczamy punkt o rzędnej równej σ . W ten sposób wyznaczamy odpowiadającą wartość wydłużenia ϵ , któremu odpowiada naprężenie rzeczywiste równe σ_{rz} .

Wyznaczanie własności technologicznych

Wydłużenie procentowe próbki po rozerwaniu A powinno być wyznaczone z dokładnością nie mniejszą niż $\pm 0,5\%$.

Jeżeli odległość pomiędzy miejscem rozerwania się próbki a najbliższym znakiem pomiarowym na próbce jest równa lub większa od jednej trzeciej początkowej długości pomiarowej l_0 , to końcową długość pomiarową l_u należy zmierzyć pomiędzy skrajnymi rysami, przy jednoczesnym zapewnieniu osiowego i ścisłego przylegania do siebie dwóch części próbki. Pomiar należy przeprowadzić z dokładnością 0,25 mm.

Jeżeli odległość pomiędzy miejscem rozerwania się próbki a najbliższym znakiem pomiarowym na próbce zawiera n działek i jest mniejsza od jednej trzeciej długości początkowej długości pomiarowej l_0 , to końcową długość pomiarową l_u trzeba wyznaczyć według następującej metody. Należy złożyć obie części rozerwanej próbki (która przed rozerwaniem zawierała N działek), tak aby ich osie tworzyły linię prostą, a powierzchnie przełomów możliwie ściśle przylegały do siebie. Jeżeli liczba $(N - n)$ jest parzysta, to należy zmierzyć długość

odcinka $l(n)$ i długość odcinka $l\left(\frac{(N-n)}{2}\right)$ działek. Wówczas wydłużenie procentowe po rozerwaniu A wyznacza się ze wzoru:

$$A = \frac{l(n)+2 \cdot l\left(\frac{(N-n)}{2}\right)-l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

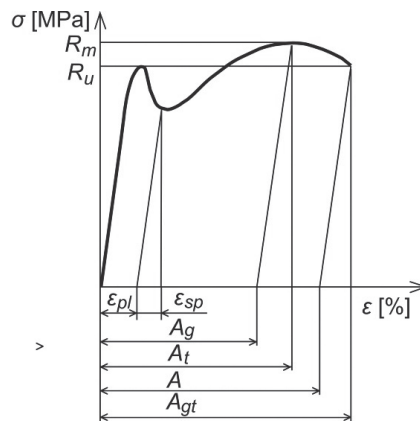
Jeżeli liczba $(N - n)$ jest nieparzysta, to należy zmierzyć długość odcinka $l(n)$, długość odcinka $l\left(\frac{(N-n-1)}{2}\right)$ oraz długość odcinka $l\left(\frac{(N-n+1)}{2}\right)$. Wydłużenie procentowe po rozerwaniu A należy wyznaczyć ze wzoru:

$$A = \frac{(AB+l\left(\frac{(N-n-1)}{2}\right))+l\left(\frac{(N-n+1)}{2}\right)-l}{l_0} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Wydłużenie całkowite procentowe po rozerwaniu A_t należy wyznaczyć z wykresu naprężenie–odkształcenie przy rozciąganiu (rys. 3.7), z dokładnością nie mniejszą niż $\pm 0,5\%$.

Wydłużenie nieproporcjonalne procentowe przy największej (granicznej) sile A_g należy wyznaczyć z wykresu naprężenie–odkształcenie przy rozciąganiu (rys. 3.7), z dokładnością nie mniejszą niż $\pm 0,5\%$.

Wydłużenie całkowite procentowe przy największej sile A_{gt} należy wyznaczyć z wykresu naprężenie–odkształcenie przy rozciąganiu (rys. 3.7), z dokładnością nie mniejszą niż $\pm 0,5\%$.



Rys. 3.7. Charakterystyka naprężenie–odkształcenie przy rozciąganiu próbki metalowej

Przewężenie procentowe przekroju Z należy wyznaczyć z dokładnością nie mniejszą niż $\pm 1\%$. Przy tym należy złożyć razem dwie części próbki, tak aby ich osie tworzyły linię prostą, i dokonać pomiarów niezbędnych do oszacowania pola przekroju poprzecznego po zerwaniu S_u z dokładnością $\pm 2\%$.

Porównanie wydłużeń procentowych po rozerwaniu jest możliwe tylko wtedy, gdy:

- 1) początkowe długości pomiarowe próbek oraz kształt i pola przekroju poprzecznego próbek są takie same;
- 2) próbki mają ten sam współczynnik proporcjonalności.

3.1.4. Unieważnienie próby rozciągania

Próbę rozciągania unieważnia się w pięciu przypadkach:

- 1) na próbce utworzyła się więcej niż jedna szyjka;
- 2) próbka rozerwała się poza długością pomiarową;
- 3) próbka rozerwała się w miejscu znaku lub rysy spowodowanej niewłaściwą obróbką mechaniczną;
- 4) próbka rozerwała się i nie wykazuje wymaganego wydłużenia lub przewężenia;
- 5) próbka rozerwała się na skutek miejscowej wady wewnętrznej materiału.

3.1.5. Przygotowanie raportu z badań

W raporcie z badań należy podać:

- 1) tytuł badania i numer normy [58];
- 2) dane dotyczące maszyny wytrzymałościowej (typ, zakres pomiarowy i dokładność wskazań układu pomiarowego siły);
- 3) oznaczenia identyfikujące próbki;
- 4) materiał, z jakiego wykonano próbki;
- 5) położenie próbek oraz kierunki ich pobierania;
- 6) kształt i wymiary próbek przed badaniem;
- 7) wymiary próbek po badaniu;
- 8) wyniki próby (charakterystyki rozciągania statycznego, oszacowane wartości własności plastycznych w procentach oraz wartości własności wytrzymałościowych w MPa, które należy zaokrąglić do liczby całkowitej);
- 9) opis wad materiałowych (jeżeli takie występują);
- 10) temperaturę badania.

3.2. Wyznaczanie modułu sprężystości podłużnej, umownej granicy sprężystości i umownej granicy plastyczności

3.2.1. Cel ćwiczenia

Celem statycznej próby rozciągania jest oszacowanie wybranych *własności wytrzymałościowych* (umownej granicy sprężystości i umownej granicy plastyczności) oraz *modułu sprężystości podłużnej* w odniesieniu do wymagań podanych w normie PN-EN ISO 6892-1:2010 [58] (por. p. 3.1).

3.2.2. Podstawowe definicje

Umowna granica plastyczności przy wydłużeniu trwałym (R_T) – jest to naprężenie, które odpowiada sile powodującej trwały przyrost początkowej długości pomiarowej próbki badanej l_0 . Symbol umownej granicy plastyczności przy wydłużeniu trwałym musi zawierać indeks

określający procentowy przyrost początkowej długości pomiarowej badanej próbki l_0 . Na przykład R_{rc} oznacza, że osiągnięcie umownej granicy plastyczności następuje wtedy, gdy trwały przyrost długości próbki wyniesie c jej początkowej długości l_0 .

Umowna granica plastyczności przy wydłużeniu trwałym ($R_{r0,2}$) – jest to naprężenie, które odpowiada sile $F_{r0,2}$, powodującej trwały przyrost początkowej długości pomiarowej próbki badanej l_0 równy 0,2%:

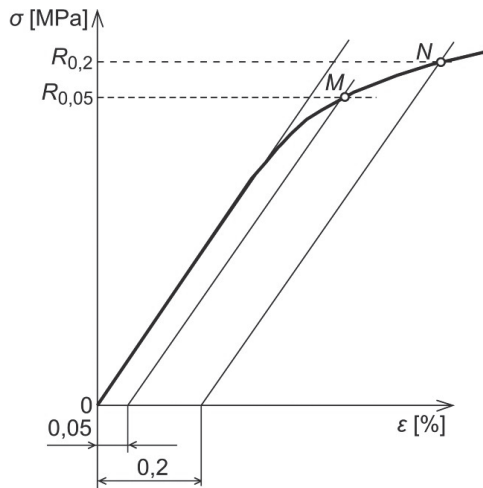
$$R_{r0,2} = \frac{F_{r0,2}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3.3)$$

Umowna granica sprężystości przy wydłużeniu trwałym ($R_{r0,05}$) – jest to naprężenie, które odpowiada sile $F_{r0,05}$, powodującej trwały przyrost początkowej długości pomiarowej próbki badanej l_0 równy 0,05%:

$$R_{r0,05} = \frac{F_{r0,05}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3.4)$$

gdzie: S_0 – początkowe pole przekroju poprzecznego próbki.

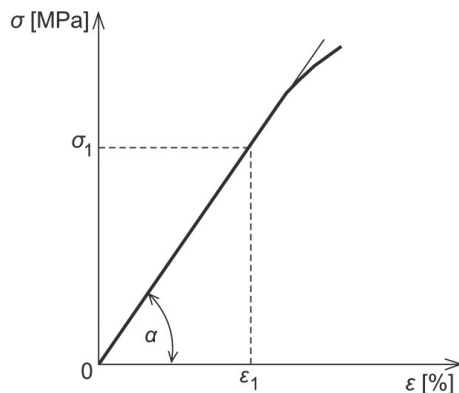
Podane powyżej umowne granice są naprężeniami uzyskanymi przy rozciąganiu jednoosiowym (rys. 3.8).



Rys. 3.8. Umowna granica sprężystości $R_{0,05}$ i umowna granica plastyczności $R_{0,2}$

Moduł sprężystości podłużnej (E) – jest to wskaźnik w zakresie odkształceń sprężystych i proporcjonalnych, który opisuje stosunek naprężenia normalnego σ_1 przy jednoosiowym stanie naprężenia do odpowiadającego mu wydłużenia względnego (bezwymiarowego) ε_1 (rys. 3.9):

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \text{ [MPa]} \quad (3.5)$$

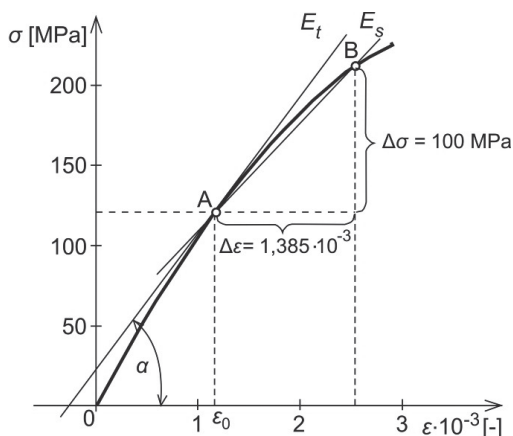


Rys. 3.9. Graficzna interpretacja modułu sprężystości E w zakresie odkształceń sprężystych i proporcjonalnych

Z punktu widzenia interpretacji graficznej moduł E jest współczynnikiem kierunkowym prostoliniowego odcinka wykresu rozciągania $\sigma = F(\epsilon)$. Jest on równy tangensowi kąta α nachylenia prostoliniowej części wykresu rozciągania. W przypadku zachodzenia odkształceń sprężystych i nieproporcjonalnych (wykres rozciągania nie wykazuje odcinka o przebiegu prostoliniowym, np. w przypadku rozciągania żeliwa lub stali sprężynowej), należy obliczyć moduł sprężystości styczny lub moduł sprężystości sieczny.

Moduł sprężystości styczny (E_t) jest równy tangensowi kąta nachylenia stycznej do krzywej rozciągania w określonym punkcie (rys. 3.10):

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \text{ [MPa]} \quad (3.6)$$



Rys. 3.10. Graficzna interpretacja modułu stycznego E_t i modułu siecznego E_s

Moduł sprężystości sieczny (E_s) jest równy tangensowi kąta nachylenia siecznej krzywej rozciągania poprowadzonej przez dwa punkty wykresu (rys. 3.10):

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} [\text{MPa}] \quad (3.7)$$

Moduły E_t i E_s są wyznaczone w zakresie naprężeń odpowiadających 10÷90% umownej granicy sprężystości.

3.2.3. Wykonanie badań

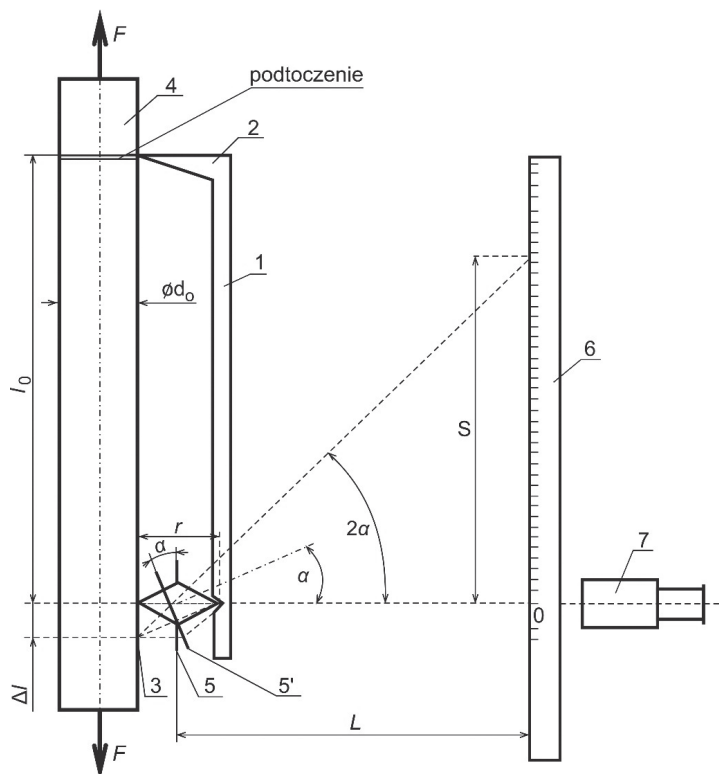
W odniesieniu do wymagań podanych w p. 3.1 do badania należy przygotować próbki i maszynę wytrzymałościową o odpowiednim zakresie (w ćwiczeniu jest wykorzystywana maszyna typu wagowego). Sposób zamocowania próbki w uchwytach maszyny wytrzymałościowej powinien zapewnić jednoosiowe rozciąganie próbki podczas badania, z jednoczesnym zniesieniem działania momentów gnących. W celu pomiaru wydłużenia należy zamontować ekstensometr opisany w p. 3.1. Szybkość przykładanego obciążenia powinna być zgodna z wymaganiami statycznej próby rozciągania, przy czym próba ta powinna być wykonana jako badanie nieniszczące (bez zerwania próbki).

Zasada pomiaru wydłużeń

W celu uzyskania wyników pomiarowych z dużą dokładnością w zakresie małych wydłużeń w ćwiczeniu jest wykorzystywany *tensometr mechaniczno-optyczny systemu Martensa*. Na rys. 3.11 przedstawiono jego schemat i zasadę działania.

Tensometr składa się z pionowego pręta (szabelki) (1), zakończonego z jednego końca ostrzem stałym (2), które jest montowane w małym podtoczeniu obwodowym próbki (4). Na drugim końcu pręta znajduje się wycięcie, w którym opiera się pryzmat (ruchome ostrze) (3). Ostrza (2) i (3) wraz z prętem (1) są dociskane do rozciąganej próbki (4) obejmami ze sprężynami. Z pryzmatem (3) jest połączone lustro (5) – przy pomocy tzw. strzemiączka, usytuowanego poziomo. Bazę pomiarową l_0 wyznacza na próbce odległość pomiędzy ostrzami stałym i ruchomym.

Przy wydłużeniu próbki równym Δl ostrze ruchome pryzmatu (3) obraca się w wycięciu pręta (szabelki) (1) o kąt α , razem z nim o taki sam kąt obraca się lustro (5) – do położenia (5'). W odległości L od pryzmatu, równoległe do próbki, jest umieszczona listwa pomiarowa (6) z podziałką milimetrową. Przez lunetę (7) obserwuje się odbitą w lusterku podziałkę listwy pomiarowej. Przy próbce nieodkształconej widoczne jest „0” podziałki, a przy wydłużonej o Δl odczyt jest równy S . Zależność pomiędzy wydłużeniem Δl a przekątną pryzmatu r jest równa: $\Delta l = r \cdot \sin\alpha$ (rys. 3.11). Obrót lusterka o kąt α powoduje obrót promienia optycznego o kąt 2α i stąd otrzymuje się, że odczyt jest równy: $S = L \cdot \text{tg}2\alpha$. Ponieważ kąt α jest bardzo mały, to z wystarczającą dokładnością można przyjąć: $\sin\alpha \approx \alpha$, $\text{tg}2\alpha \approx 2\alpha$; wówczas: $\Delta l = r\alpha$ i $S = L \cdot 2\alpha$.



Rys. 3.11. Schemat tensometru mechaniczno-optycznego Martensa

Stosunek S do Δl jest nazywany powiększeniem (przekładnią tensometru). W badaniu zastosowano $L = 1000$ mm oraz $r = 4$ mm, co daje powiększenie n równe:

$$n = \frac{S}{\Delta l} = \frac{2L}{r} = \frac{2 \cdot 1000}{4} = 500 \quad (3.8)$$

Z powyższych zależności otrzymuje się:

$$\Delta l = \frac{r}{2L} S = \frac{4}{2 \cdot 1000} \cdot S = 500^{-1} \cdot S \quad (3.9)$$

W praktyce wykorzystuje się zdwojony układ tensometrów S_1 i S_2 , umieszczonych po przeciwnych stronach próbki. Przyjmując średnią z pomiarów:

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2} \quad (3.10)$$

eliminuje się błąd wynikający z ewentualnej mimośrodowości obciążenia próbki. Przyrost długości odcinka pomiarowego jest równy:

$$\Delta l = 10^{-3}(S_1 + S_2) \quad (3.11)$$

gdzie wszystkie wielkości są wyrażone w [mm].

Zasada wykonania pomiarów

Próba jest wykonywana na maszynie wytrzymałościowej typu wagowego. Pomiary do wykresów $\sigma(\varepsilon)$ oraz $\sigma(\varepsilon)_{pl}$ prowadzi się do chwili uzyskania wartości odkształcenia trwałego próbki większego niż 0,2% (dla tensometru Martensa odpowiednikiem odkształcenia $\varepsilon = 0,2\%$ jest suma wskazań $S_1 + S_2 = 200$) lub do momentu, gdy skale listew pomiarowych obserwowane w lunetach będą się przesuwać przy stałym obciążeniu (odpowiada to płynięciu materiału próbki).

Dla $l_0 = 100$ mm, $L = 1000$ mm i $r = 4$ mm wydłużenie każdego punktu pomiarowego (całkowite i trwałe) oblicza się ze wzoru (3.11), odkształcenie zaś z poniższego wzoru:

$$\varepsilon = \frac{10^{-3}(S_1 + S_2)}{l_0} \quad [-] \quad (3.12)$$

gdzie: S_1, S_2 wyrażone są w [mm].

Wyznaczenie własności mechanicznych

Moduł sprężystości podłużnej dla materiału o charakterystyce liniowo-sprężystej

Po naniesieniu punktów pomiarowych w układzie współrzędnych *naprężenie–wydłużenie względne całkowite* (rys. 3.12) ustala się zbiór punktów znajdujących się w zakresie liniowo-sprężystym charakterystyki materiału. Jeżeli dwa punkty ułożone są na linii prostej, to moduł E jest obliczany jako:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.13)$$

W przypadku, gdy wyniki pomiarów są obarczone większymi błędami i występują odchylenia punktów od zakładanej linii prostej, to wynik jest obliczany w następujący sposób. Do zbioru punktów dopuszczalnych są przyjmowane wyłącznie punkty pomiarowe z zakresu 10÷90% przedziału liniowego (punkty znajdujące się znacznie dalej od zakładanej linii prostej są pomijane). Dla n uwzględnianych punktów moduł E oblicza się jako:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}} \quad (3.14)$$

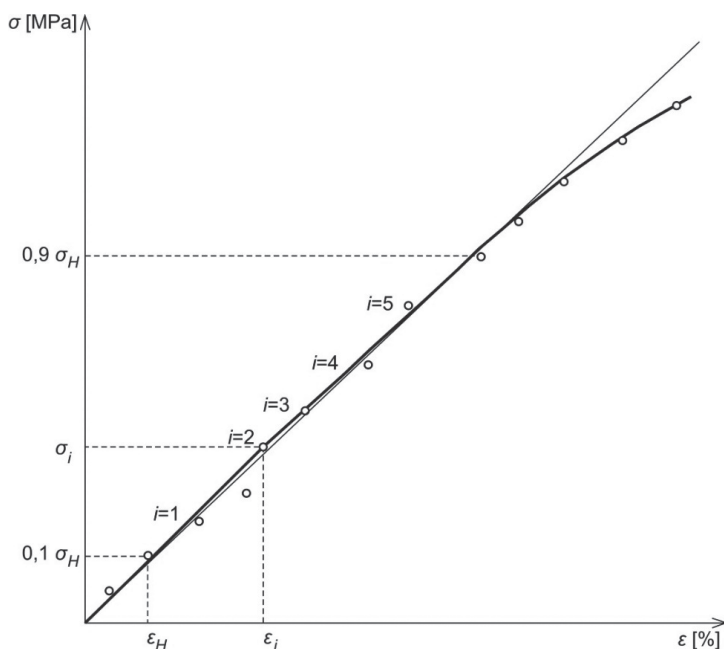
Umowne granice przy wydłużeniu trwałym

Umowne granice sprężystości i plastyczności są wyznaczone metodą graficzną z wykresu $\sigma(\varepsilon)$ (metoda obciążenia) i wykresu $\sigma(\varepsilon)_{pl}$ (metoda odciążenia) (rys. 3.13):

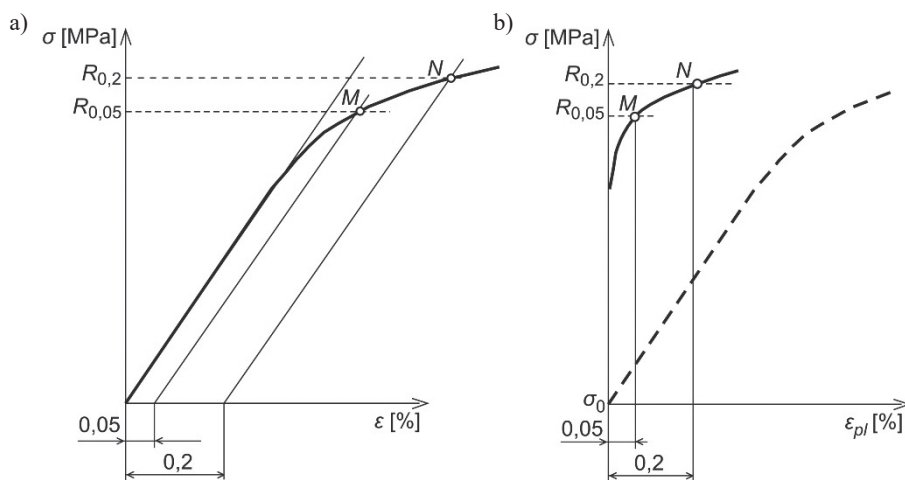
- 1) metoda obciążania – na wykresie $\sigma(\varepsilon)$ (naprężenie–odkształcenie całkowite) na osi odciętych zaznacza się odpowiednią wartość wydłużenia względnego (0,05% lub 0,2%) i prowadzi się z tego punktu linię prostą, która jest równoległa do początkowego, liniowo-sprężystego odcinka wykresu, do przecięcia z wykresem. Rzędną tego punktu stanowi szukana wartość naprężenia charakterystycznego ($R_{r,0,05}$ lub $R_{r,0,2}$);
- 2) metoda odciążania – na wykresie $\sigma(\varepsilon)_{pl}$ (naprężenie–odkształcenie trwałe) na osi odciętych zaznacza się wartość wydłużenia względnego (0,05% lub 0,2%) i prowadzi się z tego

punktu linię prostą pionową do przecięcia z wykresem. Rzędną tego punktu stanowi szukana wartość naprężenia charakterystycznego ($R_{r,0,05}$ lub $R_{r,0,2}$).

Należy zwrócić uwagę, że wykresy $\sigma(\varepsilon)$ i $\sigma(\varepsilon)_{pl}$ są uzyskiwane dla naprężeń większych od naprężenia wstępnego σ_0 . Konieczność stosowania naprężenia wstępnego σ_0 wynika z wykorzystywania maszyny wytrzymałościowej typu wagowego. W ten sposób w maszynie są likwidowane luzy istniejące w jej układzie dźwigniowym.



Rys. 3.12. Metoda obliczania modułu E – odchylenia punktów od linii prostej ($n = 5$)



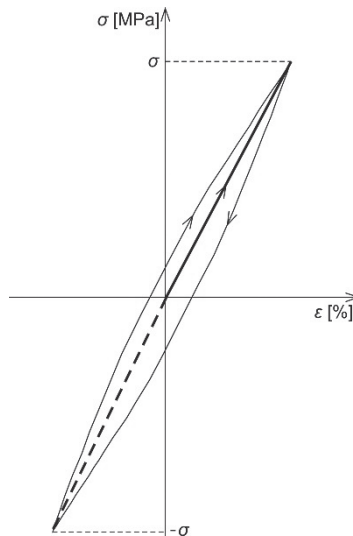
Rys. 3.13. Wyznaczanie umownych granic sprężystości metodą: a) obciążenia; b) odciążenia

Zjawisko histerezy sprężystej

Histereza sprężysta zachodzi w zakresie sprężystym materiału i polega na tym, że po odciążeniu próbki, która wcześniej była obciążona do naprężenia σ , ulega małym odkształceniom ε_H , zanikającym w krótkim czasie. Odkształcenie takie można uznać za trwałe, jest bowiem uzyskiwane po odciążeniu, z drugiej zaś strony jest to odkształcenie samoodwracalne. Z tego względu zalicza się je do odkształceń sprężystych.

Zjawisko histerezy sprężystej można wyjaśnić polikrystaliczną strukturą metalu. Powstawanie odkształceń trwałych w objętości próbki wiąże się z występowaniem dyslokacji struktury i przemieszczania się tych dyslokacji w pewnych uprzywilejowanych płaszczyznach, zwanych płaszczyznami poślizgu. Odkształcenie plastyczne powstanie wtedy, gdy kierunki przeskoków (poślizgów) zostaną uporządkowane. Taki przypadek zachodzi dopiero przy pewnej wartości naprężenia stycznego w płaszczyźnie poślizgu. Powstałe odkształcenie jest odkształceniem trwałym, które przebiega częściowo w początkowej fazie przemieszczania się dyslokacji w płaszczyznach poślizgów. Z powodu przerwania obciążenia odkształcenie zostaje zatrzymane i nie zachodzi całkowity przeskoc całej warstwy atomów. Powstaje więc stan naprężenia wstępnego, podczas którego sieci krystaliczne dążą do uporządkowania. W tym czasie następuje odbudowa sieci i powstałe częściowe odkształcenie trwałe zostaje zlikwidowane, tzn. obserwowane początkowo odkształcenie się cofa.

Pole pod pętlą histerezy sprężystej jest pracą wykonaną nad próbką w jednym pełnym cyklu obciążania (naprężenia zmieniają się od 0 do $+\sigma$, następnie do $-\sigma$ i dalej ponownie do $+\sigma$) (rys. 3.14). Praca histerezy sprężystej zamienia się częściowo w pracę niszczenia sił spójności, a częściowo w energię cieplną.



Rys. 3.14. Pętla histerezy sprężystej

3.2.4. Unieważnienie próby rozciągania

Próbę rozciągania unieważnia się w trzech przypadkach:

- 1) na próbce utworzyła się szyjka (szyjki);
- 2) próbka rozerwała się poza długością pomiarową lub w miejscu znaku bądź rysy spowodowanej niewłaściwą obróbką mechaniczną;
- 3) próbka rozerwała się na skutek miejscowej wady wewnętrznej materiału.

3.2.5. Przygotowanie raportu z badań

W raporcie z badań należy podać:

- 1) tytuł badania i numer normy [58];
- 2) dane dotyczące maszyny wytrzymałościowej (typ, zakres pomiarowy i dokładność wskazań układu pomiarowego siły);
- 3) oznaczenia identyfikujące próbki;
- 4) materiał, z jakiego wykonano próbki;
- 5) położenie próbek oraz kierunki ich pobierania;
- 6) kształt i wymiary próbek przed badaniem;
- 7) wymiary próbek po badaniu;
- 8) wyniki próby;
- 9) opis wad materiałowych (jeżeli takie występują);
- 10) temperaturę badania.

3.3. Statyczna próba ściskania metali

3.3.1. Cel ćwiczenia

Celem statycznej próby ściskania metali jest oszacowanie własności mechanicznych w odniesieniu do wymagań podanych w normie PN-H-04320: 1957 [81].

3.3.2. Podstawowe definicje

Granica plastyczności przy ściskaniu (R_{ec}) – jest to stosunek siły F_{ec} , przy której próbka ulega skróceniu bez wzrostu obciążenia, do początkowego pola przekroju poprzecznego próbki S_0 :

$$R_{ec} = \frac{F_{ec}}{S_0} [\text{MPa}] \quad (3.15)$$

Granice plastyczności wyznacza się wyłącznie dla materiałów plastycznych. W przypadku badania materiału z niewyraźną granicą plastyczności należy wyznaczyć (podobnie do przedstawionych na rys. 3.8):

- 1) umowną granicę sprężystości $R_{c0,01}$;
- 2) umowną granicę plastyczności $R_{c0,2}$.

Zjawisko skrócenia próbki bez wzrostu obciążenia nazywane jest „płynięciem”. Na wykresie następuje zagięcie wykresu ściskania.

Materiały plastyczne są badane do momentu „płynięcia”, gdyż dalsze ściskanie nie ma praktycznego zastosowania.

Wytrzymałość na ściskanie (R_c) – jest to stosunek największej siły występującej w próbce F_c do początkowego pola przekroju poprzecznego próbki S_0 :

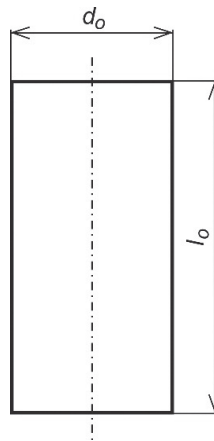
$$R_c = \frac{F_c}{S_0} [\text{MPa}] \quad (3.16)$$

Granice wytrzymałości na ściskanie wyznacza się wyłącznie dla materiałów kruchych, które w czasie próby ściskania ulegają zniszczeniu.

3.3.3. Wykonanie badań

Rodzaje stosowanych próbek

Do statycznej próby ściskania używa się próbek w kształcie walca (rys. 3.15). Próbka powinna posiadać równoległe powierzchnie czołowe, prostopadłe do powierzchni bocznej.



Rys. 3.15. Kształt i wymiary próbki

Norma [81] zaleca stosowanie próbek o średnicy d_0 równej 10 mm, 20 mm lub 30 mm. Wysokość próbek l_0 do próby statycznej zwykłej na ściskanie powinna wynosić $l_0 = 1,5 \cdot d_0$. W ćwiczeniu wykorzystuje się próbki o średnicy $d_0 = 10$ mm.

Próbki są pobierane z wyrobu lub półwyrobu przez obróbkę mechaniczną albo mogą być przygotowane przez prasowanie bądź odlanie. Wycinanie próbek należy prowadzić metodami obróbki mechanicznej. Zalecane jest unikanie wycinania próbek palnikiem acetylenowym, a w przypadku takiej konieczności należy przewidzieć naddatki materiału na obróbkę mechaniczną, która wyeliminuje strefy przegrzane. Końcowa obróbka próbek powinna być wykonana wyłącznie metodami skrawania i/lub szlifowania.

Maszyna wytrzymałościowa

Do próby ściskania można wykorzystywać maszyny wytrzymałościowe o napędzie mechanicznym (dla mniejszych sił) lub hydraulicznym (dla większych sił). Konstrukcja maszyny wytrzymałościowej powinna:

- 1) zapewniać osiowe obciążenie próbki;
- 2) zapewniać wzrost obciążenia w sposób ciągły, jednostajny, bez uderzeń i skoków, z możliwością płynnej regulacji szybkości przyrostu odkształcenia;
- 3) posiadać siłomierz, którego błąd wskazań nie przekracza $\pm 1\%$ (klasa 1);
- 4) zapewniać utrzymanie stałego obciążenia przez okres co najmniej 30 s;
- 5) zawierać odpowiednio przygotowane płyty dociskowe, które powinny być twardsze od badanych próbek;
- 6) posiadać przegub kulisty zainstalowany w jednej z płyt dociskowych.

Stosowanie płyt o twardości większej niż twardość materiału próbki gwarantuje, że płyty dociskowe nie ulegają odkształceniom plastycznym.

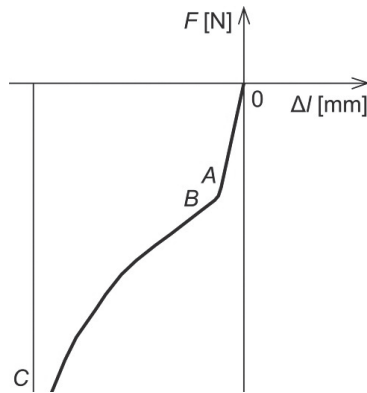
Powierzchnie płyt dociskowych powinny być wypolerowane, oczyszczone i odłuszczone, ponieważ siły tarcia, które występują pomiędzy czołową powierzchnią próbki a powierzchnią płyty dociskowej, wpływają na wynik badania. Podczas ściskania siły tarcia hamują odkształcenie próbki na jej płaszczyznach czołowych (w miejscach przylegania do płyt dociskowych maszyny) i dlatego próbka z materiału jednorodnego przybiera kształt beczkowaty.

W celu zapewnienia równomiernego przylegania powierzchni próbki do powierzchni płyty stosuje się przegub kulisty w postaci czaszy, który eliminuje punktowy styk między płytą dociskową a powierzchnią czołową próbki. Środek krzywizny czaszy powinien się przy tym pokrywać ze środkiem powierzchni czołowej próbki.

3.3.4. Ściskanie metali plastycznych

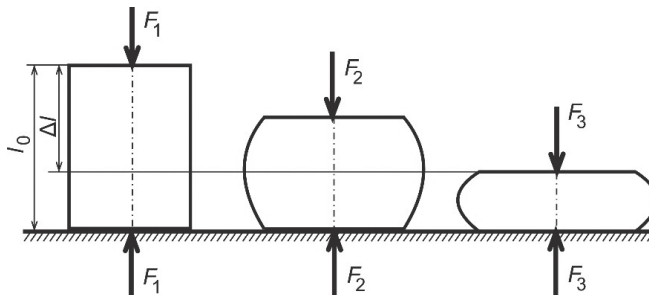
W przypadku ściskania metalu plastycznego (Al, Zn, Cu, stal miękka) w początkowym okresie ściskania skrócenie próbki jest proporcjonalne do naprężeń i – podobnie jak przy rozciąganiu – występują granica sprężystości i granica proporcjonalności. Na wykresie krzywej ściskania (rys. 3.16) występuje najpierw prostoliniowy odcinek OA , wyrażający liniową zależność pomiędzy siłą a odkształceniem. Punkt A odpowiada sile, przy której pojawia się granica proporcjonalności materiału, utożsamiana w praktyce z granicą sprężystości na ściskanie. Po przekroczeniu tej granicy na wykresie pojawia się niewielki odcinek, na którym wzrost deformacji jest znacznie szybszy. W pewnym momencie można zauważyć zatrzymanie się wskazówki siłomierza, a nawet siły obciążającej przy szybszym wzroście odkształcenia. Zjawisko to można zaobserwować na wykresie ściskania (krzywa między punktem A i punktem B). Naprężenie odpowiadające punktowi B wykresu jest nazywane granicą plastyczności przy ściskaniu. Zwiększenie siły obciążającej po przekroczeniu granicy plastyczności powoduje coraz wyraźniejsze pęcznienie próbki, objawiające się stałym wzrostem przekroju poprzecz-

nego. Krzywa wykresu ściskania szybko zaczyna wzrastać i asymptotycznie dąży do prostej poprowadzonej równoległe do osi obciążeń.



Rys. 3.16. Wykres ściskania w przypadku metali plastycznych

Pomimo spłaszczenia próbki prawie „na plasterek” nie widać na niej oznak zniszczenia (rys. 3.17). Tylko w przypadku niektórych metali (mniej plastycznych) na powierzchni bocznej pojawiają się drobne pęknięcia. Przyczyną tych pęknięć są często naprężenia rozciągające, które powstają wskutek przyjmowania przez próbkę kształtu beczkowatego. Pęknięcia te nie mogą być podstawą do wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie R_c . Wytrzymałość na ściskanie dla próbek wykonanych z metali plastycznych nie jest wyznaczana, ponieważ nie ulegają one zniszczeniu. Próbę ściskania metali plastycznych przerywa się najczęściej z powodu wyzerpania zakresu maszyny wytrzymałościowej.

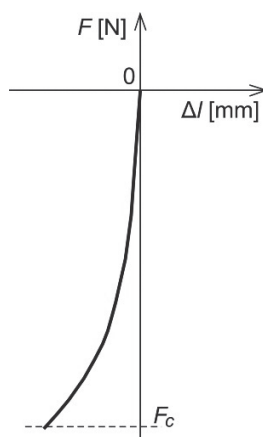


Rys. 3.17. Etapy deformacji ściskania próbki w przypadku metali plastycznych ($F_1 < F_2 < F_3$)

3.3.5. Ściskanie metali kruchych

W przypadku ściskania metalu kruchego (żeliwo, stal hartowana) w początkowym okresie ściskania (rys. 3.18) występuje najpierw prawie prostoliniowy odcinek, lekko odchylony od osi sił. Następnie wykres coraz bardziej się zakrzywia, urywając się nagle w pewnym punkcie z powodu zniszczenia próbki. Kształt próbki bezpośrednio przed zniszczeniem jest

lekko beczkowaty. Świadczy to o istnieniu niewielkich odkształceń plastycznych. Materiały kruche nie wykazują granicy plastyczności.



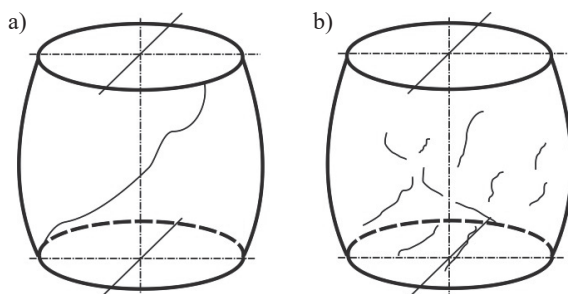
Rys. 3.18. Wykres ściskania w przypadku metali kruchych

Niszczenie metalu kruchego może przybierać postać: a) pęknięcia poślizgowego; b) pęknięcia podłużnego; c) stożkową.

Postać pęknięcia poślizgowego – pęknięcie poślizgowe w próbce (rys. 3.19a) jest skutkiem odkształceń plastycznych, które powstają pod działaniem naprężeń stycznych występujących w przekrojach nachylonych pod kątem 45° do dłuższej osi próbki (tzn. w płaszczyznach poślizgu). Pęknięcie próbki zachodzi pod kątem zbliżonym do kąta nachylenia tych przekrojów. Metalami wykazującymi pęknięcia poślizgowe są np. mosiądz i żeliwo wyższej jakości.

Postać pęknięcia podłużnego – występuje w przypadku, gdy pęknięcia zachodzą wzdłuż tworzących na powierzchni bocznej.

Postać stożkowa – jest uzyskiwana w przypadku, gdy niszczenie ściskanego materiału kruchego rozpoczyna się u podstaw próbki. Wskutek takiego niszczenia boczne powierzchnie próbki ulegają skruszeniu, odsłaniając nienaruszone części próbki w postaci stożków.



Rys. 3.19. Najczęściej obserwowane kierunki rys i pęknięć: a) materiał kruchy jednorodny; b) materiał kruchy niejednorodny

Cechą charakterystyczną materiałów kruchych jest to, że są bardziej odporne na ściskanie niż na rozciąganie, np. dla żeliwa $R_c = (3\div 4) R_m$, dla betonu $R_c = (3\div 10) R_m$, dla szkła $R_c \approx 10 R_m$.

Należy jednak pamiętać, że wyniki prób na ściskanie powinny być porównywane jedynie na próbkach geometrycznie podobnych.

3.3.6. Przeprowadzenie próby

Próbę ściskania powinno się przeprowadzić w następującej kolejności. Najpierw należy pomierzyć próbki i zapisać ich wymiary. Pomiarów te wykonuje się przy pomocy śruby mikrometrycznej z dokładnością nie mniejszą niż 0,02 mm. Średnicę należy zmierzyć w trzech miejscach w dwóch prostopadłych kierunkach. Różnica pomiędzy największą i najmniejszą średnicą nie może być większa niż 0,05 mm. Pole powierzchni przekroju poprzecznego należy obliczyć dla średnicy będącej średnią arytmetyczną z sześciu pomiarów.

Następnie trzeba dokładnie oczyścić i odtłuścić powierzchnie czołowe próbki wraz z powierzchniami płyt dociskowych. Przed badaniem należy osłonić próbkę, aby uniknąć okaleczenia ewentualnymi odpryskami. Dotyczy to szczególnie materiałów kruchych i ze stali hartowanej. W kroku końcowym należy przeprowadzić próbę ściskania.

3.3.7. Przygotowanie raportu z badań

W raporcie z badań należy podać:

- 1) tytuł badania i numer normy [81];
- 2) dane dotyczące maszyny wytrzymałościowej (typ, zakres pomiarowy i dokładność wskazań układu pomiarowego siły);
- 3) oznaczenia identyfikujące próbki;
- 4) materiał, z jakiego wykonano próbki;
- 5) położenie próbek oraz kierunki ich pobierania;
- 6) kształt i wymiary próbek przed badaniem;
- 7) wymiary próbek po badaniu;
- 8) wyniki próby;
- 9) opis wad materiałowych (jeżeli takie występują);
- 10) temperaturę badania.

3.4. Badanie udarności metali

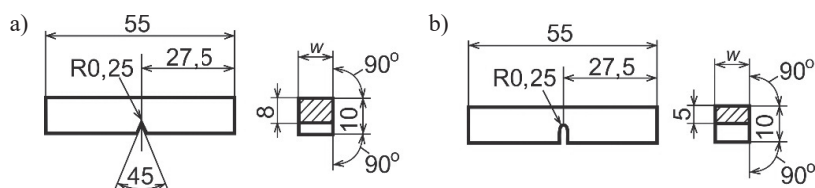
3.4.1. Wprowadzenie

Cele próby udarności obejmują określenie zachowania materiału poddanego obciążeniu udarowemu oraz wyznaczenie pracy łamania próbki K zgodnie z wytycznymi norm PN-EN ISO 148-1:2010 [46] i PN-EN ISO 148-2:2009 [47]. Za pomocą tej próby wyznacza się wpływ kształtu karbu i rodzaju materiału metalowego na wynik próby udarności. Możliwe są także

kontrola wpływu obróbki cieplnej materiału próbki oraz wykrycie wad materiałowych. Próba udarności jest przeprowadzana dla elementów przenoszących obciążenia udarowe w temperaturze zadanej. Możliwe jest również prowadzenie badań na próbkach bez karbu [70].

3.4.2. Próbkki do badań

Standardowa próbka do badań udarności ma długość 55 mm, szerokość 10 mm i wysokość 10 mm. Próbka powinna zawierać karb wycięty w kształcie litery V (rys. 3.20a) lub U (rys. 3.20b). Karb powinien się znajdować w środku jednej z bocznych ścian w kierunku prostopadłym do osi wzdłużnej próbki. Wymiar w może przyjmować wartość 10 mm, 7,5 mm, 5,0 mm lub 2,5 mm, przy czym karb powinien być wycięty na dowolnej węższej powierzchni. Tolerancje poszczególnych wymiarów powinny być zgodne z wytycznymi podanymi w normie.



Rys. 3.20. Próbkki do badań udarności: a) z karbem V; b) z karbem U

Dopuszczalne jest wycinanie próbek na „zimno” (na obrabiarkach do skrawania metali lub nożycami) albo za pomocą palników acetylenowych. Należy przy tym zagwarantować, aby próbka nie zawierała stref materiału zmienionego (przegrzanego lub zgniecionego). Strefy te należy usunąć za pomocą obróbki wiórowej.

Karb powinien być wykonany starannie, w taki sposób, aby podczas badania wizualnego nie były widoczne rysy na jego dnie. Płaszczyzna symetrii karbu powinna być prostopadła do osi dłuższej próbki. Karb można wykonać przez frezowanie, dłutowanie, wiercenie lub przecinanie. Promień zaokrąglenia dna karbu i jego głębokość mają istotny wpływ na wynik udarności próbki, ponieważ praca łamania maleje wraz ze zmniejszeniem promienia zaokrąglenia dna karbu.

3.4.3. Młot wahadłowy stosowany do przeprowadzenia próby udarności

Próbie udarności należy przeprowadzać na młocie wahadłowym typu Charpy’ego (rys. 2.9). Do badania należy wykorzystać młot, którego nóż udarowy ma promień zaokrąglenia równy 2 mm lub 8 mm (w ćwiczeniu stosuje się nóż o zaokrągleniu 2 mm). W zależności od tego promienia symbol pracy łamania powinien być uzupełniony o indeks dolny prawy. Przykładowo, dla próbki z karbem V przy badaniu nożem o promieniu 2 mm symbol pracy łamania powinien być zapisany jako KV_2 .

Przed badaniem należy sprawdzić, czy młot wahadłowy nie podlega działaniu drgań zewnętrznych. W tym celu zaleca się umieścić na konstrukcji młota zbiornik z wodą i sprawdzić, czy na powierzchni wody nie występują widoczne zmarszczki.

3.4.4. Metoda badania

Próba udarności w warunkach kontrolowanych musi być przeprowadzana w zakresie temperatur $18 \pm 28^\circ\text{C}$. Polega ona na złamaniu jednym uderzeniem spadającego młota wahadłowego próbki, która ma karb w środku, a jej oba końce znajdują się na podporach młota wahadłowego.

Próbkę należy umieścić na podporach w taki sposób, aby zapewnić nakładanie się płaszczyzny symetrii karbu i płaszczyzny symetrii podpór w granicach $\pm 0,5$ mm.

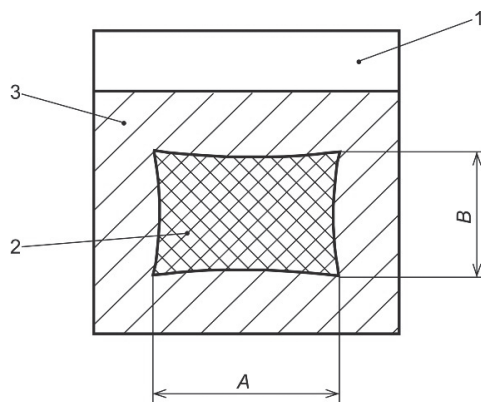
W celu przeprowadzenia badań w temperaturach obniżonych/podwyższonych próbkę należy zanurzyć w ośrodku oziębiającym/ogrzewającym i utrzymać ją w tym środowisku do czasu ustalenia temperatury w całej objętości próbki. Po wyjęciu z tego ośrodka próbkę należy złamać w ciągu 5 s.

Po umieszczeniu wahadła w pozycji wyjściowej (w najwyższym położeniu) i wyzerowaniu czujnika energii (ustawieniu wskazówki w górnym zakresie młota) należy uwolnić wahadło. Ostrze noża udarowego powinno uderzyć w próbkę po przeciwnej stronie karbu (rys. 3.20, zgodny z normami [46, 47]). Po uderzeniu należy zahamować wahadło za pomocą układu hamulcowego młota i odczytać wynik pomiaru z czujnika młota wahadłowego.

3.4.5. Analiza i zapis wyników pomiaru

Praca łamania (udarność) próbki z karbem V powinna zostać oznaczona symbolem KV, natomiast próbki z karbem U – symbolem KU. Jeżeli norma przedmiotowa wyrobu nie przewiduje inaczej, to wynik udarności należy podać jako wartość średnią z pięciu pomiarów. Wynik udarności próbki niezłamanej może zostać podany w protokole badań z adnotacją „niezłamana”.

Opis przełomu każdej próbki powinien zawierać procentowy udział obszaru odkształceń kruchych i obszaru odkształceń poślizgowych (rys. 3.21).

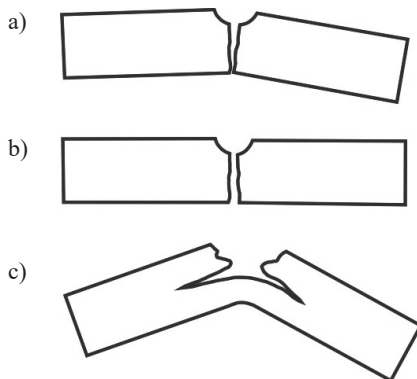


Rys. 3.21. Przełom próbki z zaznaczonym obszarem odkształceń kruchych (pole powierzchni jest oznaczone za pomocą liniowych wymiarów A i B) i obszarem odkształceń poślizgowych (obszar przełomu z ominięciem obszaru odkształceń kruchych):

1 – karb, 2 – odkształcenie kruche, 3 – odkształcenie poślizgowe

Pomiędzy pracą łamania K a rodzajem złomu istnieje pewna zależność. Z tego względu obserwacja złomów po próbie udarności pozwala na określenie własności mechanicznych badanego materiału. Rozróżnia się cztery charakterystyczne rodzaje złomów:

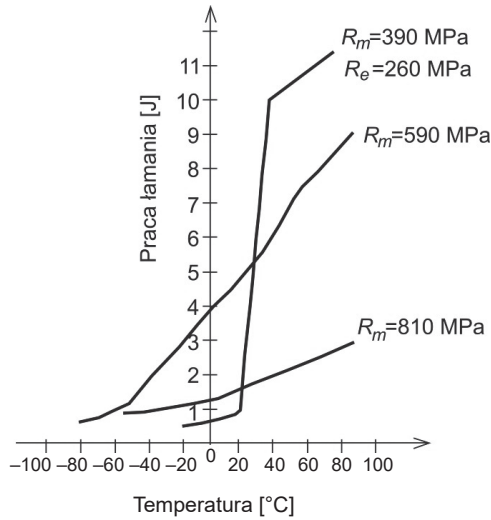
- 1) złom poślizgowy (plastyczny) – próbka została złamana i pęknięcie nastąpiło po przekroczeniu granicy plastyczności, tj. przy znacznym odkształceniu trwałym (rys. 3.22a);
- 2) złom kruchy – próbka pękła, nie wykazując widocznego odkształcenia plastycznego (rys. 3.22b);
- 3) złom mieszany – wykazuje cechy złomu poślizgowego i kruchego. Na części przełomu (najczęściej zewnętrznej) występują odkształcenia trwałe, a na pozostałej – przełom kruchy. Wówczas określa się procentowy udział przełomu kruchego i poślizgowego w przekroju;
- 4) złom specyficzny z rozwarstwieniem – wskazuje na duży stopień anizotropowości materiału, który mógł być spowodowany obróbką plastyczną albo obecnością jednego lub większej liczby pasm zanieczyszczeń (rys. 3.22c).



Rys. 3.22. Złom: a) poślizgowy; b) kruchy; c) specyficzny z rozwarstwieniem

3.4.6. Określenie temperatury kruchości

Temperatura ma duży wpływ na zachowanie materiału pracującego w warunkach dynamicznych (udarowych). Wpływ ten jest szczególnie w przypadku stali. Z tego względu próbę udarności wykonuje się w pewnym zakresie temperatur. Na podstawie wyników próby udarności uzyskuje się krzywą udarności. Na rys. 3.23 przedstawiono przykładowe krzywe uzyskane przy badaniu próbek wykonanych z trzech gatunków stali. Na podstawie krzywej udarności wyznacza się temperaturę, poniżej której energia potrzebna do złamania próbki gwałtownie spada. Temperatura ta jest nazywana *temperaturą kruchości*, gdyż materiał próbki przy tej temperaturze ma właściwości materiału kruchego [4].



Rys. 3.23. Zależność udarności od temperatury dla trzech gatunków stali

Należy również zaznaczyć, że przejście materiału w stan kruchy zależy także od wieloosiowego stanu naprężeń (występowanie karbu), obciążenia dynamicznego, niskiej temperatury oraz metalurgicznego stanu materiału.

3.4.7. Przygotowanie raportu z badań

W raporcie z badań należy podać:

- 1) tytuł badania i numer normy [46];
- 2) rodzaje i wymiary próbek do badań;
- 3) oznaczenie identyfikujące materiał próbek;
- 4) temperaturę badania;
- 5) wyniki próby (praca łamania K (tzn. KU lub KV) [J]);
- 6) opis przelomów (zgodnie z dodatkiem C normy [46]);
- 7) identyfikację młota wahadłowego (typ, znak fabryczny, rok produkcji, numer serii, zakres pomiarowy);
- 8) dodatkowe informacje zawierające: opis kierunków pobierania próbek, opis wybożenia boczego (zgodnie z dodatkiem B normy [46]), krzywą udarności (zgodnie z dodatkiem D normy [46]) oraz temperaturę przejścia w stan kruchy, liczbę próbek niezłamanych, niepewność pomiarową.

3.5. Dynamiczna próba rozciągania metali

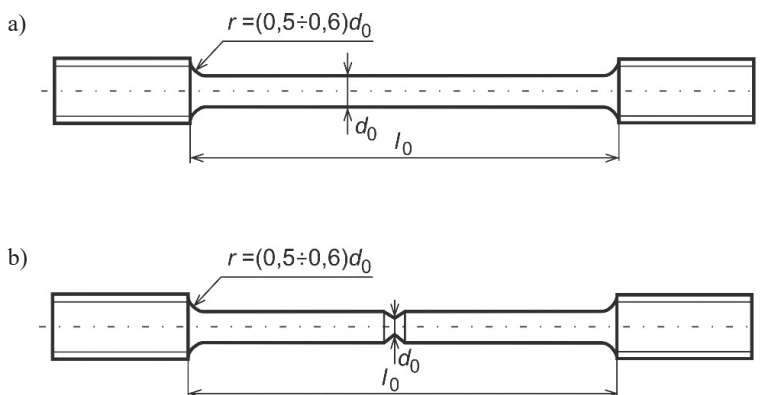
3.5.1. Wprowadzenie

Dynamiczną próbę rozciągania metali przeprowadza się na próbkach wykonanych z elementów konstrukcyjnych ulegających obciążeniom dynamicznym, jak np. łańcuchy, liny, sworznie, haki, zaczepy. Próba ta polega na rozerwaniu próbki przez dynamiczne przyłożenie siły osiowej. Dynamiczna próba rozciągania osiowego nie jest znormalizowana.

Za pomocą porównania zachowania próbek z karbem i bez karbu poddanych dynamicznej próbie rozciągania osiowego i statycznej próbie rozciągania osiowego określone są własności mechaniczne badanego materiału.

3.5.2. Próbkki i urządzenie do rozciągania dynamicznego

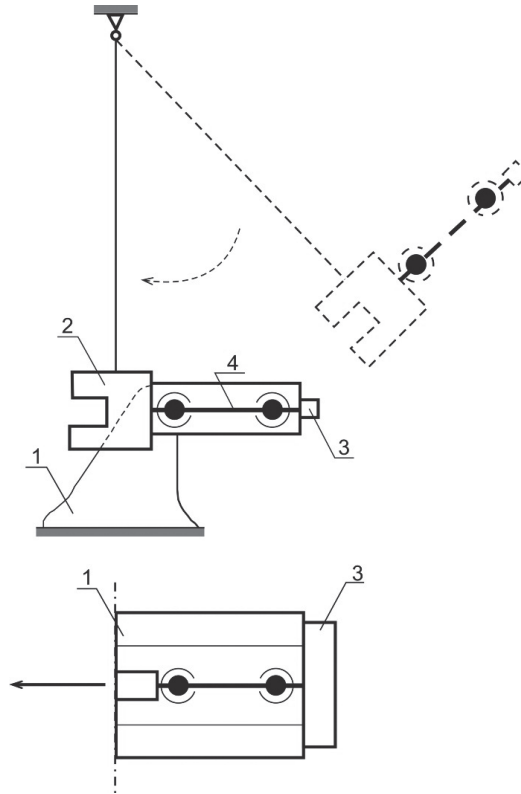
Próbki do rozciągania dynamicznego mają przekrój kołowy z główkami gwintowymi oraz długość pomiarową równą l_0 , przy czym promień przejścia r także powinien posiadać określoną wartość (rys. 3.24). Próbka z karbem w miejscu nacięcia karbu ma średnicę równą d_0 . Próbka bez karbu ma średnicę d_0 na całej długości pomiarowej.



Rys. 3.24. Próbkki do udarowej próby rozciągania: a) bez karbu; b) z karbem

Dynamiczna próba rozciągania jest przeprowadzana na młocie uniwersalnym typu MOHR & FEDERHAFF (rys. 2.11), którego schemat przedstawiono na rys. 3.25. Jeden koniec próbki mocuje się do tylnej części młota, na drugim końcu tej próbki zaś jest mocowana poprzeczka. Na początku badania młot ustawia się w położenie początkowe (najwyższe). Podczas badania następuje zwolnienie młota, który w najniższym położeniu (ma największą energię kinetyczną) powoduje uderzenie poprzeczki o podstawę młota, przyczyniając się do rozerwania próbki. Praca zużyta na rozerwanie próbki jest odczytywana na podziałce młota.

Należy pamiętać, że wpływ temperatury na otrzymane wyniki jest bardzo duży. Z tego względu należy zachować stałą temperaturę podczas realizacji próby.



Rys. 3.25. Schemat próby rozciągania uderowego przy użyciu młota wahadłowego:

1 – podstawa młota, 2 – młot, 3 – poprzeczka, 4 – próbka

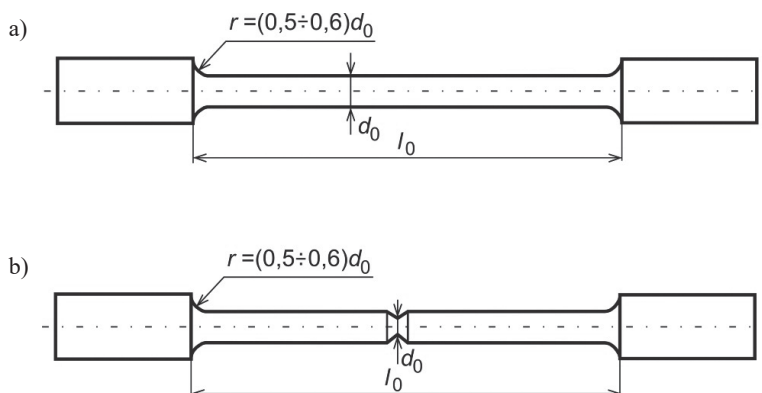
3.5.3. Naprężenia i odkształcenia przy rozciąganiu dynamicznym

Zgodnie z zasadami teorii falowej przy rozciąganiu dynamicznym naprężenia i odkształcenia próbki wykonanej z materiału jednorodnego bez wad strukturalnych (karbów) i materiałowych powstają fale, które rozchodzą się ze skończoną prędkością, tworząc falę naprężeń i odkształceń, przebiegającą od punktu przyłożenia siły do miejsc podparcia. Prędkość rozchodzenia się fal jest równa prędkości rozchodzenia się fali dźwiękowej w danym ośrodku. Fale rozkładają się na fale podłużne i poprzeczne, które interferują między sobą i w położeniach węzłowych powodują szczególnie duże odkształcenia. Dobierając odpowiedni kształt i sposób obciążenia próbki, można doprowadzić do tego, aby próbka pękła równocześnie, np. w dwóch miejscach.

Zerwanie próbki z karbem następuje w miejscu karbu przy bardzo małym udziale odkształceń trwałych. Przyczyną takiego zachowania jest karb, który powoduje spiętrzenie naprężeń w miejscu karbu.

3.5.4. Wpływ karbu

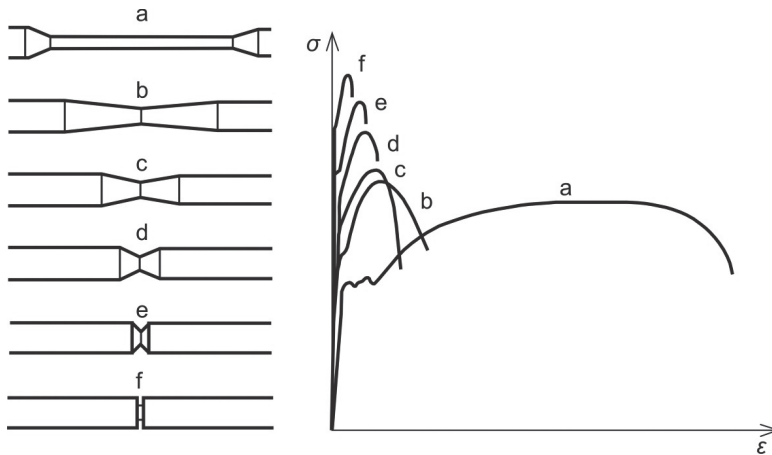
W celu porównania zachowania wpływu szybkości obciążenia osiowego przeprowadza się statyczną próbę rozciągania na próbkach bez karbu i z karbem. W tym celu wykorzystuje się próbki posiadające przekrój kołowy i główki cylindryczne bez gwintu o długości pomiarowej l_0 i promieniu przejścia r (rys. 3.26). Próbka z karbem w miejscu nacięcia karbu ma średnicę równą d_0 . Próbka bez karbu ma średnicę d_0 na całej długości pomiarowej.



Rys. 3.26. Próbkki do statycznej próby rozciągania: a) bez karbu; b) z karbem

Porównując wyniki rozciągania statycznego próbek z karbem i bez karbu, można wnioskować, że właściwości mechaniczne próbek z karbem są odmienne (rys. 3.27). Do chwili utworzenia szyjki próbka bez karbu na części pomiarowej posiada jednoosiowy stan naprężenia. Natomiast w próbce z karbem na długości pomiarowej występuje niejednorodny stan naprężeń: w miejscu karbu panuje wieloosiowy stan naprężeń (na dnie karbu próbki okrągłej zachodzi stan dwuosiowy, a na tym samym poziomie w pobliżu osi próbki zachodzi bardziej równomierny stan trójosiowy), bliżej uchwytów zaś – stan jednoosiowy [4]. Z powodu występowania wieloosiowego stanu naprężenia zerwanie próbki następuje przy bardzo małym udziale odkształceń trwałych i praca zerwania próbki z karbem jest znacznie mniejsza niż praca zerwania próbki bez karbu.

Analizując wyniki badań rozciągania statycznego próbek bez karbu i próbek z karbem, można zaobserwować wydatne zmniejszenie własności plastycznych, podwyższenie i zanikanie granicy plastyczności oraz podwyższenie wytrzymałości na rozciąganie. Materiał plastyczny zachowuje się jako pozornie kruchy. Przyczyną tego zjawiska jest przejście jednoosiowego stanu naprężenia (panującego w części roboczej próbki bez karbu do chwili pojawienia się szyjki) w trójosiowy stan naprężeń w miejscu karbu. Stan ten hamuje jednoczesne pojawienie się odkształceń plastycznych w trzech wzajemnie prostopadłych płaszczyznach, co jest przyczyną zaniku granicy plastyczności i pęknięcia próbki w sposób kruchy. Należy też zwrócić uwagę, że na zachowanie materiału przy rozciąganiu istotny wpływ ma promień zaokrąglenia dna karbu.



Rys. 3.27. Krzywe próby rozciągania statycznego dla próbek wykonanych ze stali miękkiej, dla różnych kształtów części roboczej próbek

3.5.5. Przygotowanie raportu z badań

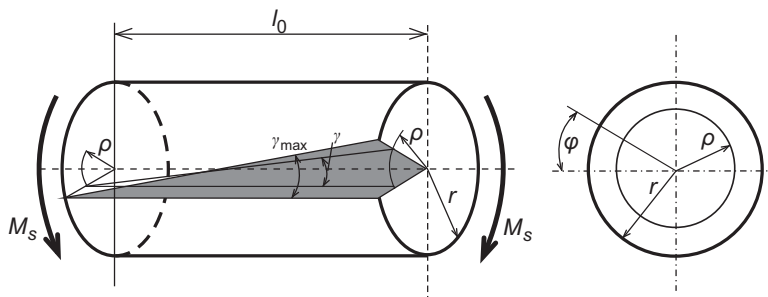
W raporcie z badań należy podać:

- 1) rodzaje i wymiary próbek do badań (wraz z opisem wymiarów geometrycznych karbu oraz jego położenia na próbce);
- 2) oznaczenie identyfikujące materiał próbek;
- 3) temperaturę badania;
- 4) wyniki próby [J];
- 5) opis przelomów przebadanych próbek;
- 6) identyfikację młota uniwersalnego (typ, znak fabryczny, rok produkcji, numer serii, zakres pomiarowy);
- 7) dodatkowe informacje zawierające: opis kierunków pobierania próbek, krzywą udarności oraz temperaturę przejścia w stan kruchy, liczbę próbek niezłamanych, niepewność pomiarową.

3.6. Statyczna próba skręcania metali

3.6.1. Wprowadzenie

Statyczną próbę skręcania metali przeprowadza się dla okrągłej próbki za pomocą skręcarci. Próbka ta jest obciążana dwoma równoważącymi się momentami skręcającymi M_s , działającymi w płaszczyznach prostopadłych do osi próbki (rys. 3.28). Jeden moment pochodzi od obciążenia zewnętrznego przyłożonego w uchwycie ruchomym, drugi zaś jest reakcją powstającą w uchwycie nieruchomym.



Rys. 3.28. Skręcanie próbki okrągłej: l_0 – długość pomiarowa próbki, γ_{max} – kąt odkształcenia postaciowego włókien skrajnych, r – promień przekroju poprzecznego próbki

Zakłada się, że w zakresie sprężystym zachowanie próbki okrągłej wykonanej z materiału jednorodnego przebiega następująco:

- część pomiarowa próbki jest skręcana równomiernie, tzn. podczas odkształcenia jej kołowe przekroje poprzeczne obracają się względem siebie o kąt φ i nie ulegają deplacji (wypaczeniu);
- warstwy materiału równoległe do podłużnej osi próbki w czasie skręcania tworzą linię śrubową nachyloną pod kątem γ do tworzącej próbki.

Odształcenia postaciowe współosiowych warstw walcowych w próbce są proporcjonalne do odległości tych warstw od środka próbki:

$$\rho \cdot \varphi = \gamma \cdot l_0 \quad (3.17)$$

gdzie: γ – kąt odkształcenia postaciowego włókien leżących wewnątrz próbki,
 ρ – promień przekroju poprzecznego warstwy wewnętrznej próbki.

W zakresie sprężystym zachowanie materiału jest opisane prawem Hooke'a przy skręcaniu:

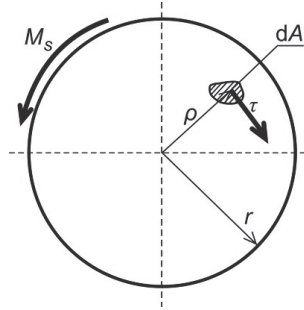
$$\tau = G \cdot \gamma \quad (3.18)$$

gdzie: G – moduł sprężystości postaciowej materiału próbki (moduł Kirchhoffa),
 τ – naprężenie styczne od skręcania.

Z warunku równości momentów sił zewnętrznych i wewnętrznych działających w przekroju próbki wynika następująca zależność (rys. 3.29):

$$M_s = \int_{(A)} \rho \cdot \tau \cdot dA = \frac{G \cdot J_0 \cdot \varphi}{l_0} \quad (3.19)$$

gdzie: $J_0 = \int_{(A)} \rho^2 dA$ – biegunowy moment bezwładności przekroju.



Rys. 3.29. Moment skręcający sił zewnętrznych i naprężenia styczne

Naprężenie styczne jest równe:

$$\tau = \frac{M_s}{J_O} \rho \quad (3.20)$$

Dla $\rho = r = \frac{d}{2}$, a więc w warstwach zewnętrznych próbki, naprężenie styczne jest największe i wynosi:

$$\tau_{max} = \frac{M_s \cdot d}{J_O \cdot 2} = \frac{M_s}{W_O} \quad (3.21)$$

gdzie: W_O – biegunowy wskaźnik przekroju na skręcanie, równy $W_O = \frac{J_O}{\frac{d}{2}}$.

Biegunowy moment bezwładności J_O pełnego przekroju kołowego wynosi (rys. 3.29):

$$J_O = \int_{(A)} \rho^2 \cdot dA = \int_0^r \rho^2 \cdot 2\pi\rho \cdot d\rho = \frac{\pi r^4}{2} = \frac{\pi d^4}{32} \cong 0,1d^4 \quad (3.22)$$

natomiast biegunowy wskaźnik przekroju na skręcanie W_O pełnego przekroju kołowego wynosi:

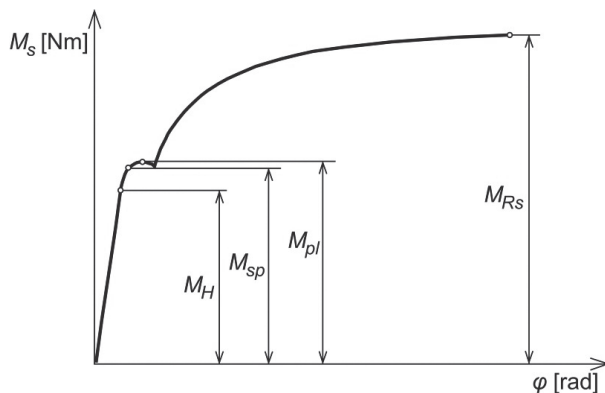
$$W_O = \frac{\pi d^3}{16} \cong 0,2d^3 \quad (3.23)$$

Związek pomiędzy kątem skręcania φ a kątem odkształcenia postaciowego γ jest następujący (rys. 3.28):

$$\varphi = \frac{M_s \cdot l_0}{G \cdot J_O} \quad (3.24)$$

3.6.2. Próba skręcania metali

Do celów praktycznych wykres skręcania sporządza się w układzie współrzędnych $M_s = M_s(\varphi)$ (rys. 3.30), gdzie: M_s – moment skręcający próbkę, φ – kąt skręcania próbki.



Rys. 3.30. Wykres skręcania próbki stalowej o średniej zawartości węgla

Granica proporcjonalności na skręcanie:

$$R_{Hs} = \frac{M_H}{W_O} \text{ [MPa]} \quad (3.25)$$

gdzie: M_H – największa wartość momentu skręcającego, przy którym zachodzą sprężyste odkształcenia proporcjonalne do kąta skręcenia (spełnione jest prawo Hooke'a) (rys. 3.30), W_O – wskaźnik przekroju na skręcanie.

Granica sprężystości na skręcanie:

$$R_{sps} = \frac{M_{sp}}{W_O} \text{ [MPa]} \quad (3.26)$$

gdzie: M_{sp} – największy moment skręcający, przy którym jeszcze zachodzą sprężyste odkształcenia (rys. 3.30).

Granica plastyczności na skręcanie:

$$R_{es} = \frac{M_{pl}}{W_O} \text{ [MPa]} \quad (3.27)$$

gdzie: M_{pl} – moment skręcający przy osiągnięciu granicy plastyczności (przy pierwszym spadku momentu); w warstwie zewnętrznej materiału zachodzą odkształcenia plastyczne (rys. 3.30).

Wytrzymałość na skręcanie:

$$R_{ms} = \frac{M_{RS}}{W_O} \text{ [MPa]} \quad (3.28)$$

gdzie: M_{RS} – największy moment skręcający występujący w próbce po przekroczeniu granicy plastyczności; uplastycznieniu ulega cały przekrój próbki (rys. 3.30).

3.6.3. Obliczanie wartości charakterystycznych

W praktyce wyznacza się:

- granicę proporcjonalności na skręcanie (dla materiałów plastycznych i materiałów kruchych);
- granicę sprężystości na skręcanie (dla materiałów plastycznych i materiałów kruchych);
- granicę plastyczności na skręcanie (dla materiałów plastycznych);
- wytrzymałość na skręcanie (dla materiałów plastycznych i materiałów kruchych).

Granica proporcjonalności jest granicą stosowalności prawa Hooke'a. W pobliżu tej granicy leży granica sprężystości, przy której występują wyłącznie odkształcenia sprężyste. Przy granicy plastyczności pojawiają się wyraźne odkształcenia trwałe, które zmieniają kierunek przebiegu krzywej skręcania. Cechy granicy plastyczności przy skręcaniu nie występują tak wyraźnie jak przy próbie rozciągania miękkiej stali, gdyż odkształcenia plastyczne zachodzą najpierw w zewnętrznej warstwie próbki. Począwszy od granicy plastyczności, krzywa skręcania wzrasta na ogół bardzo łagodnie, aż do zniszczenia próbki.

W przypadku, gdy granica sprężystości i granica plastyczności nie przebiegają wyraźnie na wykresie skręcania, to należy je wyznaczyć, korzystając z zależności pomiędzy kątem odkształcenia postaciowego γ i wydłużeniem względnym ε_1 :

$$\gamma = 2 \cdot \varepsilon_1 \quad (3.29)$$

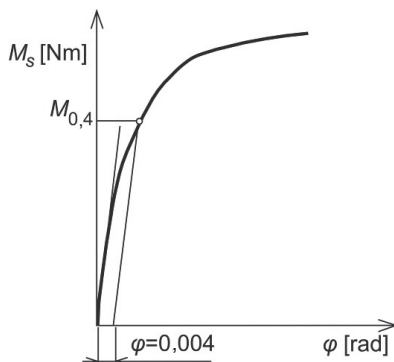
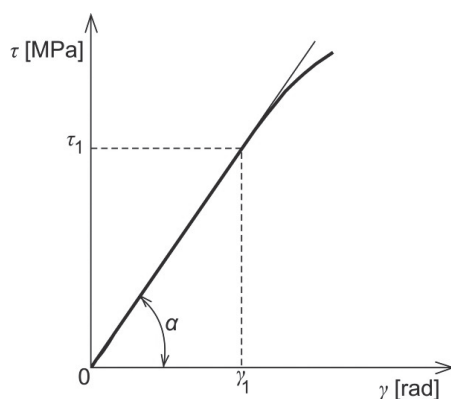
W celu wyznaczenia umownej granicy plastyczności przy rozciąganiu przyjmuje się, że wydłużenie względne jest równe $\varepsilon = 0,2\%$. Zatem dla umownej granicy plastyczności na skręcanie kąt odkształcenia postaciowego będzie równy $\gamma = 0,4\%$. Wówczas odpowiednikiem $R_{0,2}$ będzie $R_{es0,4}$ przy skręcaniu. Wszystkie wskaźniki przy oznaczeniach ważnych dla rozciągania należy pomnożyć przez 2:

$$\varphi = \gamma \cdot \frac{l_0}{r} = \frac{2\varepsilon_1 \cdot l_0}{r} \quad (3.30)$$

Otrzymany wtedy dopuszczalny kąt skręcania jest wyrażony w radianach. Kąt φ , odpowiadający odkształceniu postaciowemu względnemu γ , odmierza się na wykresie, podobnie jak przy próbie rozciągania. Wyznaczony w ten sposób moment $M_{0,4}$ jest potrzebny do wyznaczenia $R_{es0,4}$. Graficzną metodę wyznaczania umownej granicy plastyczności $R_{es0,4}$ podano na rys. 3.31.

Moduł sprężystości postaciowej (moduł Kirchhoffa) G w zakresie odkształceń sprężystych i proporcjonalnych przy skręcaniu jest stosunkiem naprężenia stycznego τ do odpowiadającego mu kąta odkształcenia postaciowego γ (rys. 3.32):

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3.31)$$

Rys. 3.31. Wykreślna metoda wyznaczania przybliżonej wartości umownej granicy plastyczności $R_{es0,4}$ Rys. 3.32. Zależność $\tau = f(\gamma)$ w przypadku odkształceń sprężystych i proporcjonalnych

Z graficznej interpretacji modułu G wynika (rys. 3.32), że jest to współczynnik kierunkowy prostoliniowego odcinka wykresu rozciągania $\tau = f(\gamma)$, który jest równy $\text{tg}(\alpha)$.

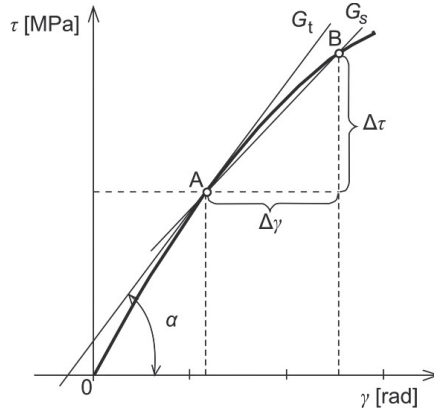
W przypadku odkształceń sprężystych i nieproporcjonalnych, kiedy wykres skręcania nie wykazuje odcinka o przebiegu prostoliniowym (np.: żeliwo, stal sprężynowa), oblicza się moduł sprężystości styczny G_t lub sieczny G_s (rys. 3.33). W praktyce te moduły wyznaczane są w zakresie obciążeń odpowiadających naprężeniom w przedziale 10÷90% umownej granicy sprężystości.

Moduł styczny G_t jest równy tangensowi kąta nachylenia stycznej do krzywej skręcania w określonym punkcie (rys. 3.33):

$$G_t = \frac{d\tau}{d\gamma} \quad (3.32)$$

Moduł sieczny G_s jest równy tangensowi kąta nachylenia siecznej krzywej skręcania, prowadzonej przez dwa punkty wykresu (rys. 3.33):

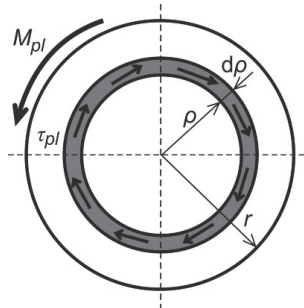
$$G_s = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad (3.33)$$

Rys. 3.33. Moduł styczny G_t i moduł sieczny G_s

Po przekroczeniu obszaru proporcjonalności przestaje obowiązywać prawo Hooke'a. Wraz z osiągnięciem stanu plastyczności pojawia się inny rozkład naprężeń niż w stanie sprężystym.

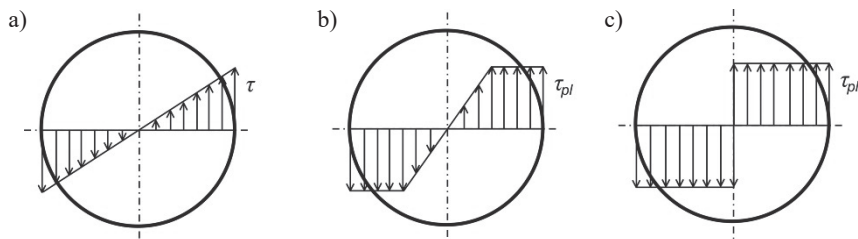
W przypadku całkowitego uplastycznienia przekroju wartość momentu M_{pl} można otrzymać z warunku równości momentów sił zewnętrznych i wewnętrznych o postaci (rys. 3.34):

$$M_{pl} = \int_{(A)} \rho \cdot \tau_{pl} \cdot dA = \int_0^r \rho \cdot \tau_{pl} \cdot 2\pi\rho \cdot d\rho = \frac{2\pi r^3 \tau_{pl}}{3} \quad (3.34)$$



Rys. 3.34. Rozkład naprężeń tnących w obszarze plastycznym

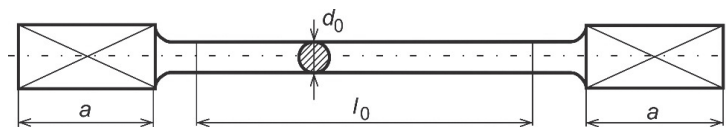
Dla próbki o przekroju kołowym obliczenie wielkości naprężenia tnącego, przy której zewnętrzna warstwa próbki osiąga granicę plastyczności, nie nastręcza trudności. Od chwili osiągnięcia uplastycznienia M_{pl} naprężenia τ_{max} nie zmieniają swej wielkości, jeżeli pominąć na ogół niezbyt silne umocnienie zachodzące podczas skręcania metali plastycznych. Wykres naprężeń stycznych z trójkątnego przechodzi w trapezowy, a ostatecznie zamienia się w prostokątny (rys. 3.35). Jest to kojarzone ze stanem ścinania [43].



Rys. 3.35. Schemat rozkładu naprężeń stycznych w poprzecznym przekroju skręconej próbki (dla materiału doskonale jednorodnego i przy pominięciu umocnienia): a) w obszarze sprężystym; b) w obszarze odkształceń sprężysto-plastycznych; c) w obszarze odkształceń plastycznych (przegub plastyczny)

3.6.4. Próbkki do próby skręcania

Do próby skręcania wykorzystuje się próbki o długości pomiarowej l_0 w zakresie $5 \div 20 \cdot d_0$. Najczęściej przyjmuje się $l_0 = 10 \cdot d_0$. Kształt próbki do próby skręcania przedstawiono na rys. 3.36.



Rys. 3.36. Próbkka do prób skręcania prętów okrągłych

3.6.5. Przeprowadzenie próby

Pomiar kąta skręcania za pomocą aparatu Martensa

Kąt skręcania, mierzony za pomocą aparatu Martensa (rys. 3.37), w danym przekroju próbki oblicza się z zależności:

$$\frac{S}{L} = \operatorname{tg} 2\varphi \cong 2\varphi \quad (3.35)$$

skąd:

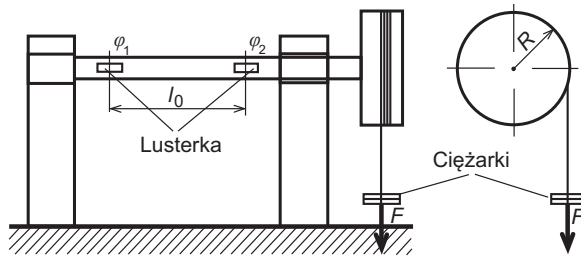
$$\varphi \cong \frac{S}{2L} \quad (3.36)$$

gdzie: $S = S_2 - S_1$, zaś S_1, S_2 – wartość odczytów na skalach 1 i 2 aparatu Martensa w [mm] z dokładnością do 0,1 mm,

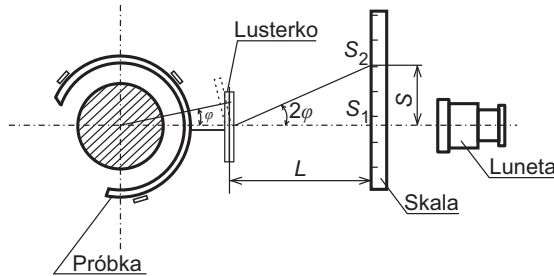
$L = 1 \text{ m}$ – odległość skali od lusterka.

Podczas próby wykorzystuje się próbkę o średnicy d , natomiast promień tarczy, na której zawieszane są ciężarki, wynosi R . Kąt skręcania próbki obliczamy z zależności (rys. 3.38):

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (3.37)$$



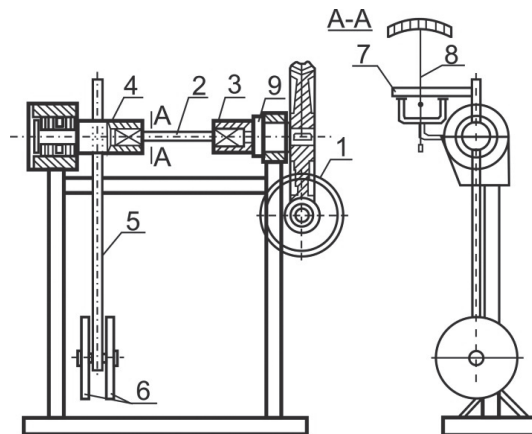
Rys. 3.37. Schemat aparatu Martensa stanowiska do pomiaru kąta skręcenia



Rys. 3.38. Schemat pomiaru kąta skręcenia za pomocą aparatu Martensa

Wykonanie statycznej próby skręcenia na skręcarce

Skręcarka składa się z urządzenia napędowego (1) z przekładnią o napędzie mechanicznym, uchwytów do próbek (3, 4) oraz siłomierza (8) mierzącego i rejestrującego wartość momentu skręcającego w postaci wykresu (rys. 3.39). Skręcarka wyposażona jest w przekładnię ślimakową (1) o napędzie mechanicznym z odpowiednio dobranym przełożeniem.



Rys. 3.39. Schemat skręcarki

Próbkę (2) o odpowiednich końcówkach umieszcza się w uchwytach napędowym (3) i pomiarowym (4), z którym połączona jest dźwignia (5). Na dźwigni osadza się wymienne obciążniki (6), dopasowane do obranego i przewidzianego dla danej maszyny zakresu momentu skręcającego. Wychylenie dźwigni ciężarowej podczas obciążenia próbki z położenia pionowego wykorzystuje się do pomiaru momentu skręcającego. Obrót dźwigni poprzez zębatkę (7) powoduje obrót wskazówki siłomierza (8), wyskalowanej w jednostkach momentu skręcającego. Wykres skręcania $\tau = \tau(\gamma)$ wykreslany jest na bębnie przez rysik sprzężony ze wskazówką siłomierza. Bęben napędzany jest za pomocą linki połączonej z uchwytem (3, 4).

3.6.6. Wyznaczenie modułu sprężystości postaciowej

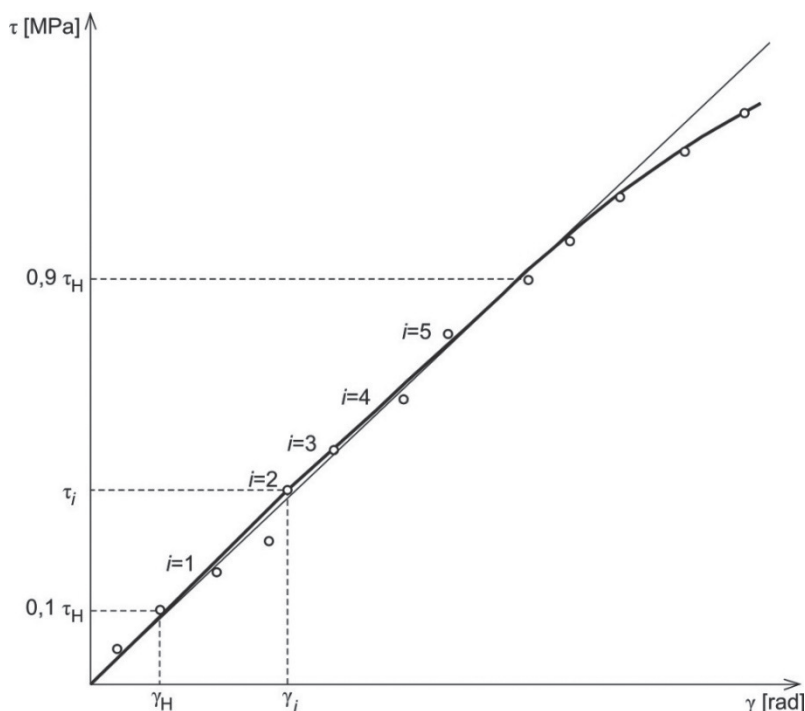
Moduł sprężystości postaciowej (moduł Kirchhoffa) G oblicza się jako stosunek (rys. 3.40):

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad (3.38)$$

gdzie:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta M_s}{W_O} \quad (3.39)$$

$$\Delta\gamma \cong \frac{r}{l_0} \Delta\varphi \quad (3.40)$$



Rys. 3.40. Wykres skręcania – obliczanie modułu G oraz odchylenia punktów od linii prostej ($n = 5$)

Po podstawieniu (3.39) i (3.40) do (3.38) otrzymuje się:

$$G(\Delta M_s, \Delta \varphi) \cong \frac{\Delta M_s l_0}{\Delta \varphi J_0} \quad (3.41)$$

Po naniesieniu punktów w układzie $\tau(\gamma)$ (naprężenie – kąt odkształcenia postaciowego) (rys. 3.40) ustalany jest zbiór punktów znajdujących się w zakresie liniowo-sprężystym charakterystyki materiału.

W przypadku, gdy punkty ułożone są na linii prostej, moduł G oblicza się jako:

$$G = \frac{\Delta \tau}{\Delta \gamma} = \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{\gamma_i - \gamma_{i-1}} \quad (3.42)$$

Natomiast gdy wyniki pomiarów są obarczone większymi błędami i występują duże odchylenia punktów od zakładanej linii prostej, to należy uwzględnić wyłącznie punkty pomiarowe z zakresu 10÷90% przedziału liniowego, a tym samym pominąć pozostałe. Wtedy dla n uwzględnianych punktów moduł G oblicza się ze wzoru:

$$G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{\gamma_i - \gamma_{i-1}} \quad (3.43)$$

Współczynnik Poissona ν , wiążący moduł sprężystości postaciowej G z modułem sprężystości wzdłużnej, opisuje następująca zależność:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.44)$$

3.6.7. Przygotowanie raportu z badań

W raporcie z badań należy podać:

- 1) dane dotyczące maszyny wytrzymałościowej (typ, zakres pomiarowy i dokładność wskazań układu pomiarowego siły);
- 2) oznaczenia identyfikujące próbki;
- 3) materiał, z jakiego wykonano próbki, położenie próbek oraz kierunki ich pobierania;
- 4) kształt i wymiary próbek przed badaniem;
- 5) wyniki próby (charakterystyki skręcania statycznego, wytrzymałość na skręcanie oraz moduł sprężystości postaciowej, jeżeli przeprowadzono nieniszczącą próbę skręcania);
- 6) opis wad materiałowych (jeżeli takie występują);
- 7) temperaturę badania.

3.7. Badanie odkształcenia za pomocą tensometrii oporowej

3.7.1. Podstawy teoretyczne

Tensometria jest wykorzystywana do pomiaru odkształceń ciała stałego w zakresie proporcjonalnym (prawa Hooke'a). Na podstawie odkształceń możliwe jest oszacowanie wielkości sił i momentów wywołujących te odkształcenia.

W praktyce odkształcenia są mierzone wyłącznie na powierzchni ciała [25]. W przypadku jednokierunkowego stanu naprężenia odkształcenie odcinka pomiarowego ε wynosi:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.45)$$

gdzie: ΔL – zmiana długości odcinka pomiarowego,

L_0 – długość początkowa odcinka pomiarowego (baza pomiarowa), przy czym dla długości aktualnej odcinka pomiarowego L zachodzi zależność $\Delta L = L - L_0$.

Należy pamiętać, że im mniejsza jest długość bazy pomiarowej L_0 , tym odkształcenie odcinka ε jest bliższe rzeczywistej wartości odkształcenia występującego na powierzchni badanego elementu.

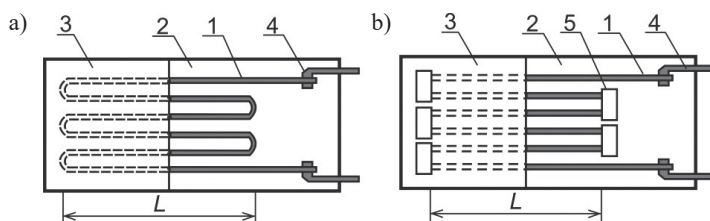
W praktyce wykorzystuje się: tensometry elektryczne (oporowe, indukcyjne, pojemnościowe, piezoelektryczne i magnetyczne) i tensometry mechaniczne (optyczno-mechaniczne oraz strunowe).

Działanie tensometrów oporowych polega na wykorzystaniu zjawiska zmiany oporu elektrycznego drutu metalowego podczas zmiany jego długości.

Ze względu na budowę wyróżniamy dwa podstawowe typy tensometrów oporowych:

- drucikowe: wężykowe, kratowe, zygzakowe, choinkowe, spiralne;
- foliowe.

Tensometr wężykowy (rys. 3.41a) składa się z drucika oporowego o średnicy $0,02 \pm 0,05$ mm w postaci wielokrotnego wężyka, który jest naklejony na podkładce nośnej wykonanej z bibułki lub folii taśmy celuloidowej albo cienkiego papieru. Dopływ prądu odbywa się za pomocą dwóch grubszych przewodów. Są one przyłutowane do końca drucika oporowego. Drucik oporowy jest chroniony od góry za pomocą nakładki (paska papieru). Tensometr ten powinien być naklejany na powierzchnię badanego elementu konstrukcyjnego za pomocą specjalnego kleju.

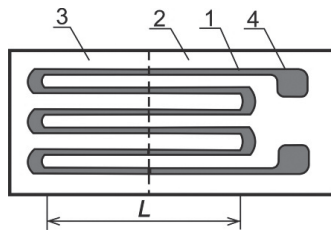


Rys. 3.41. Tensometry drucikowe: a) wężykowy; b) kratowy: 1 – drucik oporowy, 2 – podkładka nośna, 3 – naklejka, 4 – przewody, 5 – taśma miedziana

Tensometr kratowy (rys. 3.41b) charakteryzuje się brakiem czułości na odkształcenia w kierunku prostopadłym do kierunku ułożenia drutu oporowego na podkładce nośnej. Tensometr ten składa się z kilku równolegle ułożonych drucików, które są połączone nalutowanymi grubszymi odcinkami taśmy miedzianej. Poprzeczne taśmy miedziane wraz z drucikami oporowymi tworzą obwód elektryczny. Odcinki taśmy miedzianej stanowią bazę pomiarową

tensometru. Dopływ prądu elektrycznego odbywa się za pomocą dwóch grubszych przewodów przylutowanych do drucika pomiarowego. Odcinki drucika oporowego oraz taśmy miedzianej tworzą siatkę oporową, która jest naklejona na podkładkę nośną i chroniona od góry za pomocą nakładki.

Tensometr foliowy (rys. 3.42) składa się z wężykowatej siatki oporowej wykonanej z cienkiej folii metalowej naklejonej na podkładkę nośną. Część pomiarowa siatki pokryta jest ochronną nakładką, wykonaną z folii tworzywa sztucznego. Do zakończeń siatki oporowej dołączone są grubsze przewody elektryczne. Siatkę oporową wykonuje się przy użyciu metody fotochemicznej. Tensometr foliowy jest przyklejany do powierzchni badanego elementu konstrukcyjnego za pomocą specjalnego kleju.



Rys. 3.42. Tensometr foliowy: 1 – drucik oporowy, 2 – podkładka nośna, 3 – naklejka, 4 – przewody

Właściwa praca tensometru oporowego zależy od sposobu przymocowania do powierzchni badanego elementu konstrukcyjnego. Tensometry należy przyklejać ze szczególną dokładnością i przy zachowaniu wyjątkowej czystości. Powierzchnię, na którą nakleja się czujnik, powinno się przetrzeć papierem ściernym w celu usunięcia nierówności, a następnie odtłuścić przy pomocy odpowiedniego środka chemicznego. Następnie na powierzchnię należy nałożyć kilka warstw kleju i połączyć tensometr z badaną powierzchnią poprzez lekki docisk. Pomiaru można rozpocząć po całkowitym wyschnięciu kleju.

Kleje tensometryczne stosowane do naklejania tensometrów na powierzchnie badanych elementów konstrukcyjnych powinny spełniać szereg wymagań:

- brak pełzania i histerezy;
- brak wpływu wilgotności;
- brak wpływu zmian temperatury;
- dobra przyczepność kleju;
- wystarczająca wytrzymałość mechaniczna;
- wystarczająca izolacja elektryczna.

Opór elektryczny tensometru oporowego oblicza się z zależności:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (3.46)$$

gdzie: ρ – opór właściwy,

L – długość czynna drutu tensometru (odcinka pomiarowego)

S – pole przekroju poprzecznego drucika oporowego.

Zakłada się, że tensometr oporowy może być rozciągany lub ściskany w kierunku równoległym do osi dłuższej drucika oporowego o przekroju kołowym o średnicy d i polu przekroju poprzecznego:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3.47)$$

Wówczas w zakresie sprężystym proporcjonalnym w dowolnym miejscu drucika oporowego występuje jednokierunkowy stan naprężenia normalnego σ (zgodnie z prawem Hooke'a):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.48)$$

gdzie: E – moduł Younga materiału drucika oporowego.

Odształcenia jednostkowe w dowolnym kierunku poprzecznym drucika wynoszą:

$$\varepsilon_1 = -\nu \cdot \varepsilon \quad (3.49)$$

gdzie: ν – liczba Poissona materiału drucika oporowego.

Logarytmując obustronnie zależność (3.46), otrzymuje się:

$$\ln R = \ln \rho + \ln L - \ln S \quad (3.50)$$

Różniczkując obydwie strony powyższego równania, uzyskuje się:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} \quad (3.51)$$

Po zastosowaniu metody różnic skończonych równanie (3.51) przyjmuje postać:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} \quad (3.52)$$

Logarytmując obustronnie wzór na pole przekroju poprzecznego S drucika oporowego (3.47) oraz różniczkując obydwie strony tej zależności, otrzymuje się następującą zależność:

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta d}{d} \quad (3.53)$$

Średnica drucika d jest wymiarem prostopadłym do osi drutu, stąd odkształcenie jednostkowe w kierunku poprzecznym wynosi:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta d}{d} \quad (3.54)$$

Uwzględniając równanie (3.49), uzyskuje się zależność:

$$\frac{\Delta d}{d} = -\nu \cdot \varepsilon \quad (3.55)$$

Z zależności (3.53)–(3.55) można uzyskać:

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\nu \cdot \varepsilon \quad (3.56)$$

Podstawiając powyższe wyrażenie do równania (3.52) oraz uwzględniając (3.45), otrzymuje się zależność:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \varepsilon + 2\nu \cdot \varepsilon$$

którą można przedstawić następująco:

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon} + 1 + 2\nu \right) \cdot \varepsilon \quad (3.57)$$

Stosunek względnego przyrostu oporu do odkształcenia jednostkowego dla pewnych wartości ε jest wielkością stałą i nazywany jest współczynnikiem odkształcenia tensometru lub stałą tensometru k :

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon} + 1 + 2\nu \quad (3.58)$$

Graniczne wartości odkształcenia jednostkowego ε , dla których k się nie zmienia, nazywamy zakresem pomiarowym tensometru oporowego. Związek pomiędzy względnym przyrostem oporu a odkształceniem jednostkowym przyjmuje więc postać liniową:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (3.59)$$

i stanowi on podstawową zależność tensometrii oporowej.

Stała tensometru k zależy od następujących czynników:

- materiału, z jakiego wykonany jest drucik oporowy;
- sposobu ułożenia drucika oporowego;
- rodzaju kleju;
- rodzaju materiału podkładki.

Wartość stałej tensometru wyznacza się doświadczalnie. Stała tensometru k , długość bazy pomiarowej L oraz oporność R drucika oporowego stanowią parametry charakteryzujące tensometr oporowy. Parametry charakteryzujące tensometr są podawane przez producenta na opakowaniu czujników, np. RL 20/150 oznacza tensometr oporowy o bazie pomiarowej $L = L_0 = 20$ mm i oporności $R = 150 \Omega$.

Tensometry oporowe cechują się wysoką czułością pomiaru (z dokładnością do $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-6}$) i wysoką dokładnością pomiarów, która wynika z liniowej charakterystyki tensometru, oraz niewielkimi wymiarami, co pozwala na stosowanie tensometrów przy pomiarach w miejscach trudno dostępnych oraz do badania zjawiska spiętrzenia naprężenia.

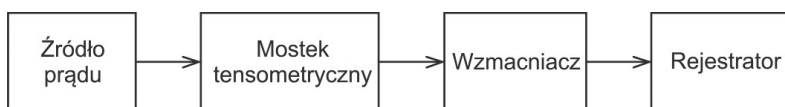
Tensometry oporowe mają również pewne wady, do których można zaliczyć: skomplikowany proces naklejania tensometru na badany element konstrukcyjny; jednorazowość użycia,

gdyż po zdjęciu tensometru z punktu pomiarowego urządzenie ulega uszkodzeniu; wrażliwość na zmiany temperatury i wilgotność.

3.7.2. Układy pomiarowe

Układy pomiarowe wykorzystywane do pomiarów tensometrycznych składają się z (rys. 3.43):

- 1) elementu zasilającego (generator lub inne źródło prądu);
- 2) tensometru oporowego z kompensacją lub mostka elektrycznego z tensometrem czynnym;
- 3) wzmacniacza zwiększającego amplitudę impulsu z czujnika (bez zniekształceń);
- 4) urządzenia rejestrującego zmiany mierzonej wielkości fizycznej.



Rys. 3.43. Schemat układu pomiarowego

Jedną z wad tensometrii oporowej jest jej wrażliwość na temperaturę. Zmiana temperatury otoczenia o ΔT powoduje zmianę: oporności właściwej drucika oporowego, odkształcenia materiału badanego elementu konstrukcyjnego, odkształcenia drucika oporowego i oporności przewodów układu pomiarowego poza tensometrem.

Wzrost temperatury tensometru wywołany przepływem prądu elektrycznego przez tensometr powoduje zmianę temperatury drucika oporowego i zmianę jego oporności właściwej. Względny przyrost oporu drucika oporowego tensometru wywołany zmianą temperatury otoczenia określa następująca zależność:

$$\frac{\Delta R_1}{R_0} = (\alpha - \beta) \cdot k \cdot \Delta T \quad (3.60)$$

gdzie: ΔR_1 – przyrost oporu drucika oporowego tensometru,

R_0 – początkowy opór drucika oporowego tensometru,

α – cieplny współczynnik rozszerzalności liniowej materiału badanego elementu konstrukcyjnego,

β – cieplny współczynnik rozszerzalności liniowej drucika oporowego tensometru,

ΔT – przyrost temperatury otoczenia.

Względny przyrost oporu drucika oporowego wywołany ogrzaniem drucika oporowego o ΔT wynosi:

$$\frac{\Delta R_2}{R_0} = \gamma_1 \cdot \Delta T \quad (3.61)$$

gdzie: γ_1 – współczynnik termicznych zmian oporu materiału drucika oporowego.

Przyrost temperatury drucika oporowego zależy od wartości natężenia prądu przepływającego przez drucik oraz od warunków chłodzenia tensometru i różni się od zmiany tem-

peratury otoczenia, stąd względny przyrost oporu uwzględniający różnicę pomiędzy zmianą temperatury druczika a zmianą temperatury otoczenia jest określony zależnością:

$$\frac{\Delta R_3}{R_0} = (\gamma_1 - \beta \cdot k) \cdot \Delta T_d \quad (3.62)$$

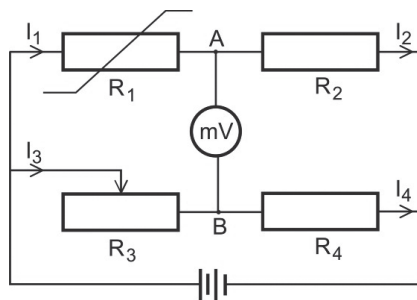
gdzie: ΔT_d – różnica pomiędzy przyrostem temperatury druczika oporowego i przyrostem temperatury otoczenia.

Całkowity względny przyrost oporu druczika oporowego wynosi:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta R_1}{R_0} + \frac{\Delta R_2}{R_0} + \frac{\Delta R_3}{R_0} = [(\alpha - \beta) \cdot k + \gamma_1] \cdot \Delta T + (\gamma_1 - \beta \cdot k) \cdot \Delta T_d \quad (3.63)$$

Wpływ zmiany temperatury na działanie tensometru oporowego można skompensować za pomocą:

- kompensacji wewnętrznej;
- tensometru kompensacyjnego połączonego z tensometrem czynnym (pomiarowym) w układzie mostka Wheatstone'a (rys. 3.44).



Rys. 3.44. Mostek Wheatstone'a

Kompensacja wewnętrzna polega na szeregowym połączeniu tensometru z opornikiem kompensacyjnym o oporze R_k . Opór R_k dobiera się tak, by wypadkowa zmiana oporu układu tensometru i opornika kompensacyjnego była równa zero:

$$\Delta R + \Delta R_k = 0 \quad (3.64)$$

gdzie: ΔR_k – przyrost oporu opornika kompensacyjnego.

Drugi sposób kompensacji polega na połączeniu tensometru czynnego (pomiarowego) z tensometrem kompensacyjnym w układzie mostka Wheatstone'a. Mostek Wheatstone'a składa się wówczas z czterech gałęzi, w których umieszczone są (rys. 3.44): tensometr czynny o oporze R_1 , tensometr kompensacyjny o oporze R_2 , opornik o oporze R_3 i opornik o oporze R_4 .

Tensometr kompensacyjny kompensuje wpływ temperatury i wilgoci, jeżeli znajduje się w tych samych warunkach temperaturowych i wilgotnościowych co tensometr czynny. Tensometr kompensacyjny powinien być naklejony na tę samą powierzchnię elementu konstruk-

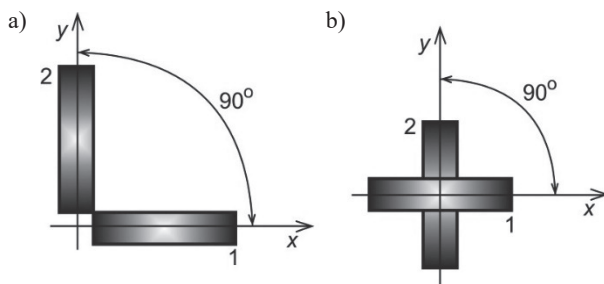
cyjnego co tensometr czynny lub na inny element konstrukcyjny wykonany z tego samego materiału co badana konstrukcja, znajdujący się w tych samych warunkach temperaturowych i wilgotnościowych.

3.7.3. Badanie płaskiego stanu naprężeń

W przypadku, gdy nie są znane kierunki główne, nie ma możliwości zbadania płaskiego stanu naprężenia przy pomocy pojedynczego tensometru oporowego. Z tego względu w praktyce stosowane są układy tensometrów naklejonych w danym punkcie pomiarowym lub blisko siebie, zwane rozetami tensometrycznymi.

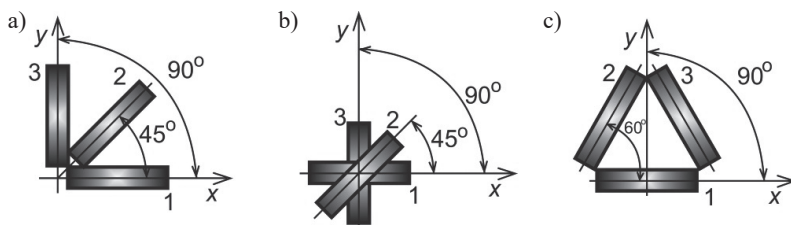
Tensometry rozety tensometrycznej są rozmieszczone tak, by zminimalizować błąd wywołany ich skończonymi wymiarami. Kąty, pod którymi rozmieszczone są tensometry w rozetach, przyjmują pewne ustalone wartości: 45° , 60° , 90° , 120° .

Najprostszymi rozetami tensometrycznymi są rozety prostokątne, utworzone przez dwa tensometry przylegające do siebie (rys. 3.45a) lub skrzyżowane (rys. 3.45b).



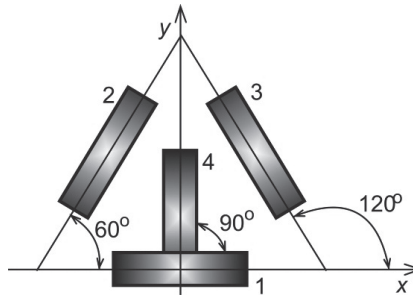
Rys. 3.45. Rozety 2-tensometryczne: a) tensometry przylegające do siebie; b) tensometry skrzyżowane

Rozety składające się z trzech tensometrów tworzą układy: prostokątne złożone (rys. 3.46a), prostokątne skrzyżowane (gwiazdowe) (rys. 3.46b) lub rozety typu „delta” (rys. 3.46c).



Rys. 3.46. Rozety 3-tensometryczne: a) prostokątne złożone; b) prostokątne skrzyżowane (gwiazdowe); c) typu „delta”

Podczas badania płaskiego stanu naprężenia najczęściej wykorzystywane są rozety składające się z czterech tensometrów, w których czwarty tensometr pełni rolę kontrolną lub pomocniczą. Przykładem takiej rozety jest rozeta T – „delta” (rys. 3.47).



Rys. 3.47. Rozeta T – „delta”

Pomiar sił w pręcie

W celu wyznaczenia siły w pręcie jednoosiowo rozciągany lub ściskany metodą tensometryczną należy przymocować jeden tensometr w kierunku głównym. Siła normalna w pręcie wynosi:

$$N = \sigma \cdot A = \varepsilon \cdot E \cdot A \quad (3.65)$$

gdzie: A – pole przekroju poprzecznego pręta,

σ – naprężenia normalne,

ε – odkształcenie jednostkowe mierzone przy pomocy tensometru oporowego,

E – moduł Younga.

Pomiar momentu gnącego i siły poprzecznej w belce zginanej

W celu określenia momentu gnącego w belce podczas jej zginania prostego należy przykleić jeden tensometr w odległości z od osi obojętnej belki, w taki sposób, aby druciki oporowe przejmujące odkształcenie były równoległe do osi długiej belki (rys. 3.48). W praktyce tensometr montuje się w punkcie pomiarowym znajdującym się na powierzchni włókien położonych w największej odległości od osi obojętnej. Wówczas moment gnący M_g względem osi obojętnej y wynosi:

$$M_g = \sigma \cdot \frac{I}{z} = \varepsilon \cdot E \cdot W \quad (3.66)$$

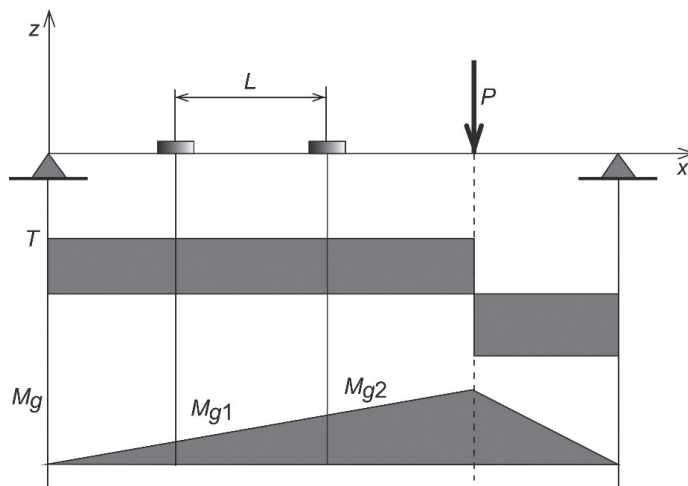
gdzie: I – moment bezwładności przekroju belki względem osi obojętnej y ,

W – wskaźnik przekroju na zginanie względem osi obojętnej y .

W celu określenia siły poprzecznej T w określonym obszarze belki należy zastosować dwa tensometry przyklejone w dwóch zadanych punktach belki, przy tym tensometry te mogą być jednocześnie stosowane do pomiaru momentu gnącego w tych punktach. Z warunków

równowagi odcinka belki o długości dx wynika, że pochodna momentu gnącego jest równa sile tnącej:

$$T = \frac{dM_g}{dx} = \frac{\Delta M_g}{\Delta x} \quad (3.67)$$



Rys. 3.48. Zginanie belki: a) obciążenie i pomiar momentu gnącego oraz siły tnącej; b) wykres siły tnącej; c) wykres momentu gnącego

Wówczas, naklejając dwa tensometry w odległości L od siebie (rys. 3.48) i mierząc momenty gnące w punktach pomiarowych, wartość siły poprzecznej T można wyznaczyć z równania:

$$T = \frac{M_{g2} - M_{g1}}{L} \quad (3.68)$$

gdzie: M_{g1}, M_{g2} – momenty gnące zmierzone w punktach pomiarowych,
 L – odległość pomiędzy punktami pomiarowymi.

Pomiar momentu skręcającego

Pomiar momentu skręcającego M_s , który działa na wałek o średnicy D , w zakresie sprężystym opiera się na zastosowaniu prawa Hooke'a:

$$M_s = \frac{\pi D^3}{16} \tau \quad (3.69)$$

Naprężenie styczne τ wywołuje stan czystego ścinania. Kierunki główne naprężeń są obrócone o kąt 45° w stosunku do osi długiej wałka. Naprężenia w kierunkach głównych mają takie same wartości, ale są przeciwnych znaków:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= -\sigma_2 \\ \varepsilon_1 &= -\varepsilon_2 \end{aligned} \quad (3.70)$$

W celu wyznaczenia momentu skręcającego należy przykleić dwa tensometry do powierzchni bocznej wałka pod kątem 45° względem osi symetrii wałka (rys. 3.49). Tensometry te mierzą odkształcenia jednostkowe ε_1 i ε_2 . Ze wzoru (3.69) wynika, że do pomiaru momentu skręcającego wystarczy jeden tensometr. Zastosowanie dwóch tensometrów pozwala na zwiększenie dokładności poprzez uśrednienie wyników pomiarów ε_1 i ε_2 . Prawo Hooke'a w przypadku skręcania ma postać:

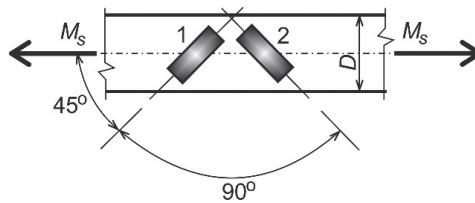
$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (3.71)$$

gdzie: γ – kąt odkształcenia postaciowego:

$$|\gamma| = |2\varepsilon_1| = |2\varepsilon_2| \quad (3.72)$$

G – moduł sprężystości postaciowej (moduł Kirchhoffa):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.73)$$



Rys. 3.49. Pomiar momentu skręcającego

Podstawiając równanie (3.72) opisujące kąt odkształcenia postaciowego do prawa Hooke'a (3.71), otrzymujemy:

$$\tau = \gamma \cdot G = 2G \cdot \varepsilon_1 \quad (3.74)$$

Ostatecznie moment skręcający wyznacza się ze wzoru:

$$M_s = \frac{\pi \cdot D^3}{16} \tau = \frac{\pi \cdot D^3}{8} G \cdot \varepsilon_1 \quad (3.75)$$

3.7.4. Przygotowanie raportu z badań

W raporcie z badań należy podać:

- 1) dane dotyczące układu pomiarowego stosowanego do badań tensometrycznych;
- 2) rodzaj czujników tensometrycznych oraz ich położenie na badanej powierzchni;
- 3) opis elementu/konstrukcji oraz miejsce wykonania badań tensometrycznych;
- 4) temperaturę badania oraz warunki otoczenia (wilgotność, ciśnienie);
- 5) wyniki pomiarów (wyniki odkształceń i naprężeń).

3.8. Badanie twardości metali

3.8.1. Wstęp

Twardość jest miarą oporu powstałego na powierzchni badanego materiału wskutek wciskania w niego drugiego – twardszego – ciała, nazywanego wgłębnikiem (penetratorem).

W praktyce realizuje się próby twardości:

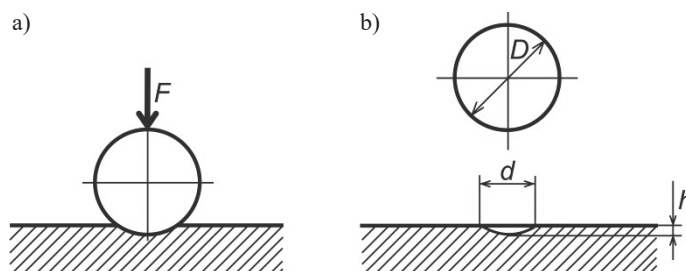
- statyczne – obciążenie wzrasta statycznie od zera do pełnej wartości (pomiar twardości sposobem Brinella, Rockwella i Vickersa);
- dynamiczne – obciążenie wzrasta dynamicznie (pomiar twardości młotkiem Poldi, skleroskopem Shore'a).

3.8.2. Pomiar twardości sposobem Brinella

Pomiar twardości metali sposobem Brinella polega na wciskaniu w badaną próbkę w określonym czasie twardej kulki stalowej lub kulki wykonanej z węglików spiekanych. Wciskanie zachodzi pod wpływem siły statycznej przyłożonej prostopadle do powierzchni próbki. Twardość jest określana na podstawie średnicy odcisku kulki, zmierzonej po jej odciążeniu (rys. 3.50). Warunki i metody badania określa norma PN-EN ISO 6506-1:2014-12 [77], wymagania odnośnie do twardościomierzy – PN-EN ISO 6506-2:2014-12 [78], kalibracje wzorców twardości – PN EN ISO 6506-3:2014-12 [79], natomiast tablice wartości twardości – PN-EN ISO 6506-4:2014-12 [80].

Pomiar twardości sposobem Brinella jest realizowany przy użyciu kulki (rys. 3.50):

- stalowej – do badania metali o twardości do 450 HB;
- z węglików spiekanych – do badania metali o twardości do 650 HB.



Rys. 3.50. Pomiar twardości sposobem Brinella: a) badany materiał przed odciążeniem; b) badany materiał po odciążeniu; D – średnica kulki, d – średnica odcisku, F – siła obciążająca, h – głębokość odcisku

W przypadku badania twardości powyżej 450 HB należy odróżnić w zapisie wartości liczbowe twardości uzyskane przy użyciu kulki stalowej (HBS) od wartości liczbowych twardości uzyskanych przy użyciu kulki z węglików spiekanych (HBW).

Twardość Brinella oblicza się następująco:

$$HB \dots (HBS \dots \text{ lub } HBW \dots) = k \cdot \frac{F}{S} \quad (3.76)$$

$$HB \dots = 0,102 \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.77)$$

$$HB \dots (HBS \dots \text{ lub } HBW \dots) = \frac{1}{\pi} \frac{2 \cdot K}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}} \quad (3.78)$$

gdzie: k – współczynnik wynikający z przejścia z układu ciężarowego na układ SI:

$$k = \frac{1}{g} \approx \frac{1}{9,80665} \approx 0,102 \text{ s}^2/\text{m} \quad (3.79)$$

g – przyspieszenie ziemskie: $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$,

F – siła obciążająca [N],

D – średnica kulki [mm],

d – średnica odcisku [mm],

S – pole powierzchni odcisku (czaszy):

$$S = \frac{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2} [\text{mm}^2] \quad (3.80)$$

K – stała obciążenia:

$$K = 0,102 \frac{F}{D^2} [\text{N/mm}^2] \quad (3.81)$$

Wartość siły obciążającej F wyznaczana jest z równania:

$$F = 9,807K \cdot D^2 [\text{N}] \quad (3.82)$$

w którym stała obciążenia K przyjmuje wartości zgodnie z tab. 3.2.

Uwaga: wartość stałej obciążenia K należy dobrać w zależności od spodziewanej twardości badanej próbki lub przedmiotu, aby uzyskać odcisk średnicy d zawartej w przedziale $0,24 \div 0,6 D$.

Należy pamiętać, że wynik pomiaru zależy od czasu narastania obciążenia i czasu trwania pełnego obciążenia. Kulkę należy obciążyć równomiernie, bez wstrząsów, do zadanej siły w przedziale czasowym równym $(8 \pm 2) \text{ s}$, licząc od chwili zetknięcia kulki z próbką.

Czas działania całkowitej siły powinien wynosić [6]:

- dla stali i żeliwa – od 10 do 15 s;
- dla metali o twardości $\geq 32 \text{ HB}$ – 30 s;
- dla metali o twardości $< 32 \text{ HB}$ – 60 s.

Tabela 3.2

Zalecane wartości stałej obciążenia K i siły obciążającej

Materiał	Twardość Brinella [HBW]	Stała obciążenia $K = 0,102 \frac{F}{D^2}$ [N/mm ²]
Stal, stopy niklu, stopy tytanu	–	30
Żeliwo ¹	< 140	10
	≥ 140	30
Miedź i stopy miedzi	< 35	5
	35÷200	10
	> 200	30
Metale lekkie i ich stopy	< 35	2,5
	35÷80	5
		10
		15
	> 80	10 15
Ołów, cyna	–	1
Spieki metalowe	Zgodnie z normą ISO 4498-1	

¹ W przypadku żeliwa nominalna średnica kulki powinna wynosić: 2,5 mm, 5 mm lub 10 mm.

Badanie należy przeprowadzić w temperaturze $23 \pm 5^\circ\text{C}$.

Odstęp środków sąsiednich odcisków przy twardości powyżej 35 HB powinien być większy od wartości $4d$, gdzie d – średnica odcisku, odstęp środka odcisku od krawędzi badanej próbki powinien zaś być większy od $2,5d$. Dla próbek o twardości poniżej 35 HB podane wyżej odstępki należy zwiększyć odpowiednio do $6d$.

Twardość Brinella jest podawana w postaci liczby, która składa się z trzech cyfr znaczących (np.: 354; 50,6; 7,24), i występującego po niej oznaczenia twardości Brinella HB... (HBS... lub HBW...), uzupełnionego dalszymi liczbami, np. 600 HBW 1/30/20 oznacza, że wynik pomiaru został uzyskany przy użyciu kulki wykonanej z węglików spiekanych o średnicy równej 1 mm, zostało przyłożone obciążenie o wartości 30 kG (tzw. kilogram techniczny, gdzie $1 \text{ kG} \approx 9,807 \text{ N}$), czas działania obciążenia wynosił zaś 20 s.

Powierzchnia badanej próbki lub przedmiotu w miejscu wykonania pomiaru twardości powinna być płaska i wygładzona oraz oczyszczona ze zgorzeli i smaru. Przy wygładzaniu nie można doprowadzić do zmiany twardości przez nagrzanie lub zgmiot. Chropowatość powierzchni próbek obrobionych mechanicznie, opisana parametrem R_a , nie powinna przekraczać $5 \mu\text{m}$. Obróbkę powierzchni badanej próbki lub przedmiotu można wykonać przez szlifowanie. Przy pomiarze twardości za pomocą kulki o średnicy $D = 1 \text{ mm}$ powierzchnię próbki należy dodatkowo wypolerować.

Kształt próbki może być dowolny, pod warunkiem że próbkę można ułożyć na stoliku twardościomierza w celu:

- prostopadłego obciążenia powierzchni pomiarowej;
- zabezpieczenia próbki przed przesunięciem i wystąpieniem odkształceń sprężystych.

Grubość próbki powinna być co najmniej 8 razy większa od głębokości odcisku h . Na odwrotnej stronie próbki nie powinno być śladów odkształceń wywołanych działaniem siły obciążającej wgłębnik.

Konstrukcja twardościomierza dla metod Brinella, Rockwella i Vickersa powinna zapewniać:

- jednoosiowe działanie siły w kierunku prostopadłym do powierzchni badanej próbki;
- płynne narastanie siły obciążającej wgłębnik, do osiągnięcia siły zadanej w wyznaczonym przedziale czasu;
- utrzymanie siły obciążenia całkowitego F w określonym przedziale czasu.

Zalety metody Brinella:

- możliwość stosowania do pomiarów twardości materiałów niejednorodnych: żeliwa, stopów łożyskowych itp. (ze względu na duże wymiary odcisków);
- jedna skala twardości dla materiałów miękkich i twardych.

Wady metody Brinella:

- nie można stosować tej metody do pomiarów twardości warstw utwardzonych i materiałów twardych (wgłębnik może ulec odkształceniom plastycznym);
- nie można stosować tej metody do pomiarów twardości małych przedmiotów, powierzchni gotowych, przedmiotów i warstw cienkich (metoda pozostawia odciski o dużych wymiarach);
- pomiary twardości wykonywane tą metodą można porównać jedynie w przypadku zgodności wszystkich warunków badania.

3.8.3. Pomiar twardości sposobem Rockwella

Pomiar twardości metali sposobem Rockwella polega na wciśnięciu wgłębniaka diamentowego w postaci stożka w próbkę o twardości w zakresach przewidzianych skalami A, C, D i N lub wgłębniaka stalowego w postaci kulki w próbkę o twardości w zakresach przewidzianych skalami B, E, F, G, H, K i T (tab. 3.3) [55–57]. Warunki badania określa norma PN-EN

ISO 6508-1:2007 [55], wymagania odnośnie do twardościomierzy – PN-EN ISO 6508-2:2007 [56], natomiast kalibracje wzorców twardości – PN-EN ISO 6508-3:2006 [57].

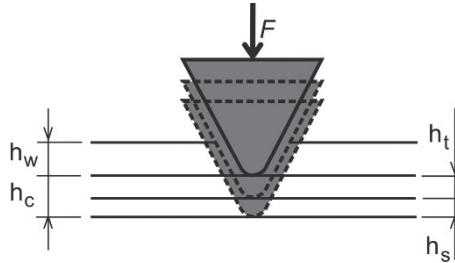
Tabela 3.3

Rodzaje pomiaru twardości sposobem Rockwella

Skala	Symbol ¹	Rodzaj wgłębnika	Siła obciążenia wstępnego F_0 [N]	Siła obciążenia głównego F_1 [N]	Siła obciążenia całkowitego F [N]	Zakres stosowalności
A	HRA	Stożek diamentowy	98,07	490,3	588,4	20÷88 HRA
B	HRB	Kulka 1,5875 mm		882,6	980,7	20÷100 HRB
C	HRC	Stożek diamentowy		1373,0	1471,0	20÷70 HRC
D	HRD	Stożek diamentowy		882,6	980,7	40÷77 HRD
E	HRE	Kulka 3,175 mm		882,6	980,7	70÷100 HRE
F	HRF	Kulka 1,5875 mm		490,3	588,4	60÷100 HRF
G	HRG	Kulka 1,5875 mm		1373,0	1471,0	30÷94 HRG
H	HRH	Kulka 3,175 mm		490,3	588,4	80÷100 HRH
K	HRK	Kulka 3,175 mm		1373,0	1471,0	40÷100 HRK
15N	HR15N	Stożek diamentowy		29,42	117,7	147,1
30N	HR30N	Stożek diamentowy	264,8		294,2	42÷86 HR30N
45N	HR45N	Stożek diamentowy	411,9		441,3	20÷77 HR45N
15T	HR15T	Kulka 1,5875 mm	117,7		147,1	67÷93 HR15T
30T	HR30T	Kulka 1,5875 mm	264,8		294,2	29÷82 HR30T
45T	HR45T	Kulka 1,5875 mm	411,9		441,3	10÷72 HR45T

¹ W przypadku skal wykorzystujących wgłębnik kulkowy symbol twardości uzupełnia się literą S, jeżeli wgłębnik kulkowy jest stalowy, lub literą W, jeżeli został wykonany z węglików spiekanych.

Podstawę określenia twardości sposobem Rockwella stanowi pomiar trwałego odkształcenia (trwałego przyrostu głębokości odcisku h_t) (rys. 3.51). Wynik jest odczytywany w jednostkach twardości HR na odpowiednio wyskalowanym czujniku.



Rys. 3.51. Zasada pomiaru twardości sposobem Rockwella przy zastosowaniu wgłębnika w postaci stożka diamentowego: h_w – głębokość odcisku pod obciążeniem wstępnym, h_c – głębokość odcisku pod obciążeniem całkowitym, h_s – głębokość odcisku sprężystego, h_t – trwały przyrost głębokości odcisku

W przypadku wgłębnika stożkowego twardość ustala się według skali HRA, HRC oraz HRD:

$$HRA, HRC, HRD = 100 - \frac{h_t}{0,002} \quad (3.83)$$

gdzie: h_t – trwały przyrost głębokości odcisku.

W przypadku wgłębnika w postaci kulki twardość określa się na podstawie skali HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK:

$$HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK = 130 - \frac{h_t}{0,002} \quad (3.84)$$

W przypadku skali HRN i HRT stosuje się następującą zależność (tab. 3.4):

$$HRN, HRT = 100 - \frac{h_t}{0,001} \quad (3.85)$$

Symbol jednostki twardości Rockwella HR uzupełnia się literą określającą skalę, według której wykonano pomiar: A, B, C, D, E, F, G, H, K, N i T oraz – na początku zapisu – liczbowym wynikiem pomiaru (tab. 3.4), np.:

- 50 HRC – twardość Rockwella mierzona w skali C (przy użyciu wgłębnika diamentowego w postaci stożka);
- 91 HRB – twardość Rockwella mierzona w skali B (przy użyciu wgłębnika stalowego w postaci kulki).

Wgłębnik może być wykonany w kształcie diamentowego stożka o kącie wierzchołkowym 120° lub kulki stalowej. Wgłębnik w kształcie stożka powinien być wypolerowany i na jego powierzchni nie mogą występować pęknięcia, zadrapania, wykruszenia ani inne wady powierzchniowe.

Wgłębnik stalowy w postaci kulki w stanie ulepszonym cieplnie powinien mieć odpowiednią twardość. Powierzchnia kulki stalowej powinna być wypolerowana i bez wad, a kulka nie powinna wykazywać podczas pomiaru odkształceń większych od dopuszczalnych odchylek średnicy.

Tabela 3.4

Oznaczenia wielkości i ich określenia w sposobie Rockwella

Oznaczenie	Wielkość	Jednostka miary
α	Kąt wierzchołkowy węgelnika diamentowego	°
R	Promień zaokrąglenia wierzchołka węgelnika diamentowego	mm
D	Średnica kulki węgelnika diamentowego	mm
F_w	Siła wstępna obciążająca węgelnik	N
F_c	Siła główna obciążająca węgelnik	N
F	Siła całkowita obciążająca węgelnik	N
h_w	Głębokość odcisku pod obciążeniem siłą wstępną F_w	mm
h_c	Przyrost głębokości odcisku pod obciążeniem siłą główną F_c	mm
h_t	Trwały przyrost głębokości odcisku, mierzony pod obciążeniem siłą wstępną F_w (po usunięciu obciążenia siłą główną F_c)	mm
HRA HRC HRD	Twardość Rockwella HR przy zastosowaniu węgelnika diamentowego w postaci stożka, obliczana ze wzoru: $HR = 100 - h_t/0,002$	HRA HRC HRD
HRB HRE HRF HRG HRH HRK	Twardość Rockwella HR przy zastosowaniu węgelnika stalowego w postaci kulki, obliczana ze wzoru: $HR = 130 - h_t/0,002$	HRB HRE HRF HRG HRH HRK
HRN HRT	Twardość Rockwella HR obliczana ze wzoru: $HR = 100 - h_t/0,001$	HRN HRT

Czujnik lub inne urządzenie pomiarowe powinny zapewniać dokładność odczytu wskazania wynoszącą co najmniej 0,5 jednostki HR (odpowiadającą zagłębieniu węgelnika o 0,001 mm), a ponadto należy umożliwić ustawienie zerowego położenia odczytu przy działaniu obciążenia siłą wstępną.

Powierzchnia badana próbki powinna być wolna od smarów, zanieczyszczeń, warstwy tlenków i innych obcych ciał. Należy także zagwarantować, aby w miejscu pomiaru powierzchnia była równa, płaska i gładka, o średnim arytmetycznym odchyleniu profilu chropowatości R_a nieprzekraczającym 2,5 μm . Grubość próbki powinna wynosić minimum $10 \cdot h_t$, gdyż podczas pomiaru na odwrotnej stronie próbki nie powinno być śladów odkształceń powstałych pod obciążeniem węgelnika.

Pomiar twardości Rockwella może być także wykonywany na próbkach o powierzchniach wypukłych. W celu prawidłowego obciążenia próbki należy zastosować podkładki w kształcie litery V. Konieczne jest uwzględnienie poprawki korekcyjnej, którą należy pobrać z normy i dodać do wyniku pomiaru twardości Rockwella.

Pomiar twardości przeprowadza się w temperaturze $10 \pm 35^\circ\text{C}$. Należy wykonać co najmniej trzy odciski w celu określenia średniej arytmetycznej wartości twardości. Odległość środków dwóch sąsiednich odcisków powinna być nie mniejsza niż 4-krotna średnica odcisku i nie powinna być mniejsza niż 2 mm. Odległość między środkiem odcisku a krawędzią próbki powinna odpowiadać co najmniej 2,5-krotnej średnicy odcisku i nie powinna być mniejsza niż 1 mm.

Siła wstępna $F_w = 98,07\text{ N}$ zapewnia ustalenie wgłębnika w nieruchomej pozycji początkowej, tzn. redukuje wpływ nierówności i chropowatości powierzchni próbki. Należy przy tym zwrócić uwagę, aby obciążenie siłą wstępną nie zostało przekroczone. W przypadku przekroczenia wartości siły wstępnej pomiar należy przerwać i wybrać nowy obszar do pomiaru. Po ustawieniu urządzenia pomiarowego w położeniu zerowym (początkowym) wgłębnik twardościomierza należy płynnie obciążyć do uzyskania siły całkowitej.

Przy utrzymaniu obciążenia siłą wstępną F_w czas obciążenia wgłębnika siłą główną F_c powinien wynosić:

- $1 \div 3\text{ s}$ dla metali, które w warunkach pomiaru wykazują odkształcenie plastyczne niezależne od czasu trwania obciążenia wgłębnika siłą całkowitą F (wyraźne zatrzymanie wskazań urządzenia pomiarowego);
- $1 \div 5\text{ s}$ dla metali, które w warunkach pomiaru wykazują nieznaczną zależność odkształceń plastycznych od czasu trwania obciążenia wgłębnika siłą całkowitą F (nieznaczny przyrost wskazań urządzenia pomiarowego);
- $10 \div 15\text{ s}$ dla metali, które w warunkach pomiaru wykazują odkształcenie plastyczne wyraźnie zależne od czasu trwania obciążenia wgłębnika siłą całkowitą F (ciągły przyrost wskazań urządzenia pomiarowego).

Liczbowy wynik pomiaru twardości zależy od wielkości trwałego przyrostu głębokości odcisku h_t . Jest on odczytywany wprost z czujnika, wyskalowanego odpowiednio w jednostkach twardości HR.

Zalety metody Rockwella:

- możliwość pomiaru twardości materiałów miękkich i twardych;
- duża szybkość pomiaru;
- łatwość odczytu twardości;
- możliwość pomiaru twardości przy produkcji masowej.

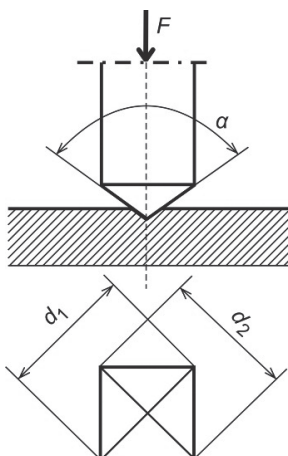
Wady metody Rockwella:

- konieczność (w zależności od twardości) używania odmiennych skal o różnych wartościach stałej skali K ;
- nie można stosować tej metody do pomiarów twardości materiałów niejednorodnych.

3.8.4. Pomiar twardości sposobem Vickersa

Pomiar twardości metali sposobem Vickersa w zakresie od HV 0,001 do HV 100 polega na wciśnięciu w badaną próbkę w określonym czasie diamentowego wgłębnika przy wybranym obciążeniu od 1,961 N do 980,7 N. Warunki badania określa norma PN-EN ISO 6507-1:2006 [51], wymagania odnośnie do twardościomierzy – PN-EN ISO 6507-2:2006 [52], kalibrację wzorców twardości – PN-EN ISO 6507-3:2006 [53], tablice wartości twardości zawarte są zaś w normie PN-EN ISO 6507-4:2006 [54]. Pomiar metodą Vickersa polega na (rys. 3.52):

- wciskaniu wgłębnika diamentowego prostopadle do powierzchni próbki siłą obciążającą F przyłożoną przez określony czas t ;
- pomiarze długości przekątnych d_1 i d_2 odcisku powstałego na powierzchni próbki po odciążeniu.



Rys. 3.52. Pomiar twardości sposobem Vickersa

Twardość Vickersa wyrażana jest stosunkiem siły F do powierzchni poboczniczy odcisku obliczonej ze średniej arytmetycznej wartości długości przekątnych:

$$HV = k \cdot \frac{F}{S} \text{ [HV]} \quad (3.86)$$

$$HV = 0,102 \frac{2F \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2} \text{ [HV]} \quad (3.87)$$

gdzie: α – kąt pomiędzy przeciwległymi ścianami ostrosłupa wgłębnika ($\alpha = 136^\circ$),
 F – całkowita siła obciążająca wgłębnik [N],
 d – średnia arytmetyczna wartości długości przekątnych odcisku d_1 i d_2 [mm]:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

k – współczynnik wynikający z przejścia z układu ciężarowego na układ SI:

$$k = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,80665} \approx 0,102 \text{ s}^2/\text{m}$$

Oznaczenie jednostki twardości Vickersa HV uzupełnia się liczbami określającymi umownie wartość siły obciążającej wgłębnik i czas działania całkowitej siły obciążającej wgłębnik, jeżeli jest inny niż standardowy, równy $10 \div 15$ s:

- 640 HV 1 – twardość Vickersa 640, zmierzona przy obciążeniu wgłębnika siłą 1 kG $\approx 9,807$ N w ciągu $10 \div 15$ s;
- 640 HV 1/20 – twardość Vickersa 640, zmierzona przy obciążeniu wgłębnika siłą 1 kG $\approx 9,807$ N w ciągu 20 s;
- 640 HV 30 – twardość Vickersa 640, zmierzona przy obciążeniu wgłębnika siłą 30 kG $\approx 294,2$ N w ciągu $10 \div 15$ s;
- 640 HV 30/20 – twardość Vickersa 640, zmierzona przy obciążeniu wgłębnika 30 kG $\approx 294,2$ N w ciągu 20 s.

Wgłębnik diamentowy powinien mieć kształt ostrosłupa foremnego o podstawie kwadratowej. Kąt pomiędzy przeciwległymi ścianami ostrosłupa powinien wynosić 136° . Wszystkie cztery ściany ostrosłupa powinny być jednakowo nachylone do jego osi, z dokładnością $\pm 0,5^\circ$. Wierzchołek ostrosłupa powinien być ostro zakończony, przy czym długość krawędzi wierzchołka utworzona przez przeciwległe ściany nie może przekraczać 0,001 mm dla małych obciążeń od HV 0,2 do HV 3 i 0,002 mm dla makro twardości od HV 5 do HV 100. Część robocza wgłębnika powinna być wypolerowana i nie może wykazywać pęknięć, zadrapań, wykruszeń lub innych wad powierzchniowych.

Mikroskop lub inne urządzenie pomiarowe używane do pomiaru przekątnych odcisku powinny zapewniać dokładność:

- $\pm 1\%$ długości – w przypadku przekątnych odcisku o długości od 0,02 mm do poniżej 0,1 mm;
- $\pm 0,001$ mm – w przypadku przekątnych odcisku o długości od 0,1 mm do poniżej 0,2 mm;
- $\pm 0,5\%$ długości – w przypadku przekątnych odcisku o długości od 0,2 mm i powyżej.

Kształt próbki może być dowolny, pod warunkiem że stolik twardościomierza zapewnia:

- prostopadłe działanie siły obciążającej w stosunku do badanej powierzchni;
- nieruchome położenie pod wpływem działania obciążenia;
- uzyskanie odcisków niezniekształconych.

Powierzchnia próbki w miejscu pomiaru powinna być wolna od zanieczyszczeń, płaska i gładka z chropowatością R_a równą $2,5 \mu\text{m}$ według normy [51]. Pomiar twardości może być także wykonany na próbkach o powierzchniach wypukłych i wklęsłych, przy czym należy wprowadzić korektę wyniku pomiaru. Dla próbek o bardzo małym przekroju poprzecznym lub przekroju nieregularnym należy przewidzieć dodatkowe podparcie próbki, np. przez wtopienie jej w żywicę.

Grubość próbki lub badanej warstwy metalu powinna być równa minimum $1,5 \cdot d$. Na odwrotnej stronie próbki nie powinno być śladów odkształceń wywołanych obciążeniem wglębniaka.

Pomiar twardości przeprowadza się w temperaturze $10 \div 35^\circ\text{C}$.

Jeżeli w normach przedmiotowych nie podano inaczej, to należy wykonać co najmniej trzy odciski w celu określenia średniej arytmetycznej wartości twardości metalu.

Odległość pomiędzy środkiem odcisku a krawędzią próbki nie powinna być mniejsza niż $2,5 \cdot d$ dla stali, miedzi i stopów miedzi oraz $3 \cdot d$ dla metali lekkich, ołowiu, cyny i ich stopów. Odległość pomiędzy środkiem sąsiednich odcisków nie powinna być mniejsza niż:

- $3 \cdot d$ dla stali, miedzi i stopów miedzi;
- $6 \cdot d$ dla metali lekkich, ołowiu, cyny i ich stopów.

Przy standardowym pomiarze twardości Vickersa HV 30 nominalna siła całkowita obciążająca wglębniak wynosi $30 \text{ kG} \approx 294,2 \text{ N}$.

Czas narastania siły powinien wynosić $2 \div 8 \text{ s}$. Czas działania obciążenia, liczony od momentu osiągnięcia całkowitej siły F obciążającej wglębniak, powinien wynosić $10 \div 15 \text{ s}$. Dla niektórych materiałów dopuszcza się przyjęcie dłuższego czasu działania całkowitej siły F obciążającej wglębniak.

Pomiar długości przekątnych odcisku należy wykonać na mikroskopie pomiarowym. Do obliczenia twardości Vickersa należy przyjąć średnią arytmetyczną wartości długości przekątnych jednego odcinka. Różnica długości przekątnych jednego odcinka nie powinna przekraczać 2% długości większej przekątnej (nie dotyczy to pomiarów mających na celu wykrycie anizotropowości metalu).

Zalety sposobu Vickersa:

- możliwość pomiaru twardości materiałów miękkich i twardych przy użyciu skali w całym zakresie twardości, bez względu na obciążenie;
- porównywalność wyników pomiarów z wynikami pomiarów wykonanych metodą Brinella;
- możliwość pomiaru twardości warstw utwardzonych małych przedmiotów.

Wadę sposobu Vickersa stanowi to, że nie można go stosować przy pomiarach twardości materiałów niejednorodnych.

3.8.5. Pomiar twardości młotkiem Poldi

Próba badania twardości metali za pomocą młotka Poldi jest metodą dynamiczną. Młotek składa się z obudowy, w której umieszczony jest ruchomy bolec zamocowany na sprężynie, oparty o płytkę wzorcową. Płytkę spoczywa na stalowej, zahartowanej kulce o średnicy 10 mm. Podczas pomiaru twardości uderza się w bolec młotkiem ręcznym z siłą około 10 N (zalecane jest użycie młotka 0,5 kg). Kulka wciskana jest zarówno w badany materiał, jak i w płytkę wzorcową o znanej twardości. Odczyt twardości odbywa się na zasadzie porów-

nawczej. Znając średnicę odcisków kulki w płytce wzorcowej i w badanym materiale, twardość badanego materiału oblicza się ze wzoru:

$$HB = HB_W \frac{D - \sqrt{D^2 - d_W^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}} \quad (3.88)$$

gdzie: HB_W – twardość płytki wzorcowej,

D – średnica kulki w młotku Poldi, $D = 10$ mm,

d – średnica odcisku w badanym materiale [mm],

d_W – średnica odcisku w płytce wzorcowej [mm].

Młotek Poldi może być wykorzystywany do określania twardości w skali Brinella takich materiałów, jak: stal, żeliwo szare, żeliwo utwardzone, brąz, aluminium, mosiądz, miedź. Pozwala on na wykonanie szybkich porównawczych pomiarów twardości. Metoda ta jest jednak mało dokładna i pomimo prób zwiększenia jej dokładności nie zapewnia w pełni wiarygodnych wyników. W płytce wzorcowej dopuszcza się wykonanie do 20 odcisków na każdej z dwóch naprzeciwległych powierzchni pomiarowych.

Zalety metody Poldi:

- może być stosowana do wykonania szybkich porównawczych pomiarów twardości;
- może być wykorzystywana do badania twardości metali w podwyższonych temperaturach;
- może być używana do pomiaru twardości dużych, ciężkich i nieprzewodzących elementów, których nie da się ustawić na stoliku stacjonarnego twardościomierza.

Wady metody Poldi:

- mała dokładność;
- wysoki koszt pomiaru ze względu na szybkie zużywanie płytki wzorcowej.

3.8.6. Pomiar twardości metodą Shore'a

Metoda Shore'a (zwana też metodą skleroskopu Shore'a) należy do najbardziej rozpowszechnionych dynamicznych metod pomiaru twardości, która zależy od właściwości sprężystych badanej powierzchni. Pomiar twardości polega na swobodnym spadaniu kulki wewnątrz szklanej rury i pomiarze wysokości, na jaką się podnosi po odbiciu. Im wyższa jest wysokość odbicia kulki, tym twardszy jest badany materiał. Odkształcenie trwale materiału (odcisk) nie wpływa na wartość liczbową pomiaru, nie jest ono bowiem mierzone podczas oszacowania wyniku.

Podczas pomiaru twardości skleroskopem Shore'a bijak o masie m (najczęściej równej 20 g), zakończony diamentowym zaokrąglonym ostrzem pomiarowym, opada swobodnie pionowo w rurce z wysokości h (najczęściej 112 mm). Do rurki przymocowana jest skala pomiarowa. Podczas uderzenia bijaka w badany materiał część energii kinetycznej wywołuje odkształcenie plastyczne badanego materiału (tzn. odcisk). Pozostała część tej energii zamienia się w odkształcenie sprężyste próbki i bijaka, co powoduje odbicie bijaka od powierzchni

próbki w rurce. Im twardszy materiał, tym większa wysokość odbicia się bijaka. W większości skleroskopów Shore'a skala podzielona jest na 130 równych części – jednostek skali odskoków.

Pomimo istnienia tablic porównawczych nie można przeliczać jednostek twardości według skali Shore'a na inne jednostki twardości. Skleroskop Shore'a stosowany jest często przy określaniu równomierności twardości po obróbce cieplno-chemicznej (po nawęglaniu lub hartowaniu). Wywołany niewielkimi plastycznymi odkształceniami mały odcisk w badanym elemencie może zostać łatwo usunięty z jego powierzchni.

Zaletą metody Shore'a jest krótki czas pomiaru (do 1 do 2 s). Metoda ta (podobnie jak pomiar twardości młotkiem Poldi) może być stosowana do pomiarów twardości w podwyższonych temperaturach i masowych pomiarów twardości niewielkich przedmiotów.

Pomiar twardości metodą Shore'a ma też szereg wad. Wysokość odbicia bijaka zależy nie tylko od twardości, ale i od modułu sprężystości badanego materiału. Odpowiednio wyskalowany skleroskop może być wykorzystywany jedynie do pomiarów twardości materiałów o tym samym module Younga. Na wyniki pomiarów wpływ mają również wymiary i masa badanych elementów.

Każde uderzenie bijaka o badany element powoduje miejscowe utwardzenie badanej powierzchni. Z tego względu każdy następny pomiar powinien być wykonywany w innym miejscu, odległym od poprzedniego o co najmniej 1 mm. W przypadku materiałów o dużej twardości (powyżej 500 HB) wynik pomiaru nie zależy od średnicy bijaka, zaznacza się jednak wpływ prowadzenia bijaka w rurce. Dla materiałów tych pomiar twardości jest dokładniejszy metodą Shore'a niż metodami statycznymi. Zaleca się wówczas stosowanie bijaków o mniejszej średnicy, zgodnie z zasadą: im mniejsza średnica bijaka, tym większa dokładność pomiarów. W przypadku materiałów bardziej miękkich należy stosować bijaki o większych średnicach. Przy większych średnicach bijaków na wyniki pomiarów wpływa również tłumienie wywołane wypychaniem powietrza spod bijaka.

Zalety metody Shore'a:

- mały odcisk może zostać łatwo usunięty z powierzchni badanego elementu;
- krótki czas pomiaru (od 1 do 2 s) umożliwia pomiary twardości w wysokich temperaturach i masowe pomiary twardości małych przedmiotów;
- w przypadku materiałów o dużej twardości (powyżej 500 HB) pomiary cechują się większą dokładnością niż metody statyczne.

Wady metody Shore'a:

- wysokość odbicia bijaka od powierzchni badanego materiału zależy od twardości materiału i modułu sprężystości E ;
- na wysokość odbicia bijaka wpływają wymiary i masa badanych elementów;
- każdy następny pomiar powinien być wykonany w innym miejscu, odległym od poprzedniego o co najmniej 1 mm, ponieważ uderzenie bijaka powoduje miejscowe utwardzenie badanej powierzchni.

3.8.7. Przygotowanie raportu z badań

W raporcie z badań należy podać:

- 1) metodę i sposób pomiaru twardości oraz numer normy;
- 2) opis badanych próbek (materiał, kształt, obszar wykonania pomiarów);
- 3) wyniki poszczególnych pomiarów wraz z wynikiem zbiorczym obliczonym za pomocą analizy statystycznej (wynik badania należy przedstawić w postaci liczbowej: wartość średnia \pm odchylenie standardowe, przy zastosowaniu odpowiednich symboli, których rodzaj zależy od metody i sposobu pomiaru twardości);
- 4) temperaturę badania oraz warunki otoczenia (wilgotność, ciśnienie).

3.9. Badanie wytrzymałości zmęczeniowej metali

3.9.1. Wstęp

Obciążenie zmienne w czasie prowadzi do powstania w materiale elementu konstrukcyjnego zmiennego stanu naprężeń, który może zainicjować rozwój pęknięcia przy naprężeniu mniejszym od wytrzymałości na rozciąganie R_m .

Zmęczeniem materiału określa się zmiany zachodzące w materiale elementu przy obciążeniu zmiennym w czasie, prowadzącym do obniżenia wytrzymałości oraz zniszczenia tego elementu [1, 28]. Przebieg zmian obciążenia elementu może mieć charakter powtarzający się lub stochastyczny.

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze zjawiskiem zmęczenia materiału, wielkościami opisującymi obciążenie i naprężenie cykliczne oraz metodyką badań zmęczeniowych.

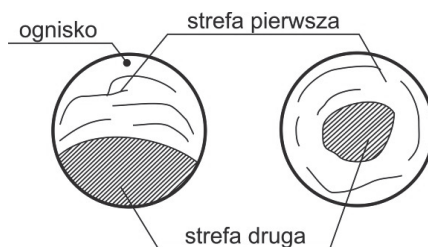
3.9.2. Podstawy

Przyczyną zmęczenia materiału są mikropęknięcia, które powstają i rozwijają się pod wpływem obciążenia zmiennego w czasie [3]. W obszarze mikropęknięcia powstaje lokalne spiętrzenie naprężeń, a po pewnym czasie zachodzi łączenie się mikropęknięć i proces propagacji przenosi się do skali makro. Proces postępuje tak długo, aż osiągnięta zostanie krytyczna długość pęknięcia, po której przekroczeniu element konstrukcyjny ulegnie gwałtownemu zniszczeniu.

Wytrzymałość zmęczeniowa (Z) jest to maksymalne naprężenie, które może przenieść element konstrukcyjny poddany działaniu nieskończonej liczby cykli okresowo zmiennych obciążeń. Jednostką wytrzymałości zmęczeniowej jest MPa.

W złomie zmęczeniowym próbki metalowej można wyróżnić dwie charakterystyczne strefy przełomu (rys. 3.53). Pierwsza nazywa się strefą zniszczenia zmęczeniowego. Ma ona często charakterystyczną gładką i błyszczącą powierzchnię. Strefa druga, bardziej gruboziarnista, powstaje nagle w ostatnim etapie pracy elementu konstrukcyjnego i jest nazywana strefą doraźną. Strefa ta jest podobna do przełomów uzyskiwanych w próbach statycznych. Strefa

zniszczenia zmęczeniowego powstaje podczas stopniowego rozwoju pęknięcia zmęczeniowego: obie powierzchnie pęknięcia naciskają na siebie podczas cyklicznego obciążenia, powodując jednocześnie wzajemne ścieranie i zgniatanie (stąd gładka i błyszcząca powierzchnia strefy pierwszej). Stopień gładkości i pozornej drobnoziarnistości wzrasta wraz ze wzrostem liczby cykli przeniesionych przez element, do całkowitego zniszczenia.



Rys. 3.53. Przelomy zmęczeniowe: a) z ogniskiem punktowym; b) z ogniskiem obwodowym

Stosunek udziału powierzchni strefy pierwszej przelomu zmęczeniowego do strefy drugiej zwiększa się wraz ze spadkiem wartości okresowo zmiennych naprężeń przenoszonych przez element. Wraz ze wzrostem okresowo zmiennych naprężeń stopień gładkości strefy pierwszej maleje. W strefie złomu zmęczeniowego często można zauważyć wyraźne linie odpowiadające kolejnym położeniom czoła pęknięcia. Linie te nazywane są liniami frontu szczeliny zmęczeniowej lub liniami spoczynkowymi. Powstają one wskutek zatrzymywania się pęknięcia w jednej płaszczyźnie i przeskoku do sąsiedniej płaszczyzny. Fakt ten można wytłumaczyć umocnieniem się materiału w obszarze linii pęknięcia, gdy obciążenie zmęczeniowe zostaje na pewien czas przerwane, a warunki fizyczne umożliwią odbudowę naruszonych ziaren w obszarze linii spoczynkowej. Na podstawie układu linii spoczynkowych można ustalić ognisko (miejsce zapoczątkowania złomu zmęczeniowego) oraz kierunki rozprzestrzeniania się pęknięcia.

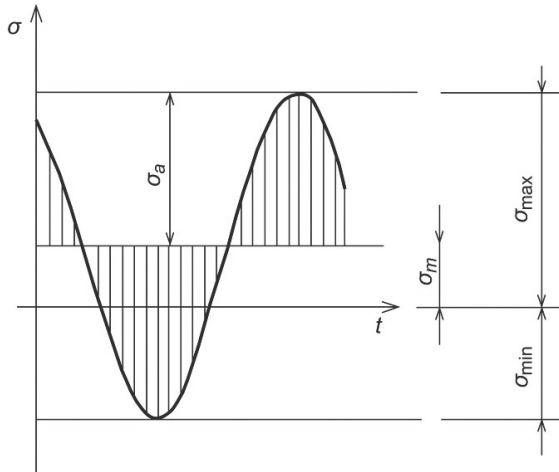
Do wielkości wpływających na zmęczenie materiału zalicza się:

- 1) lokalne spiętrzenie naprężeń (zjawisko karbu);
- 2) stan powierzchni i warstwy powierzchniowej;
- 3) wady materiału (pęcherze, duże wtrącenia niemetaliczne itp.);
- 4) efekt skali;
- 5) krótkotrwałe przeciążenia.

Zmienny stan obciążenia oddziałujący na element konstrukcyjny wywołuje w nim zmienny stan naprężenia [23]. Jednym z najprostszych do przeanalizowania przypadków obciążenia zmiennego w czasie jest osiowe rozciąganie/ściskanie pręta pryzmatycznego siłą harmoniczną, która powoduje powstanie naprężenia normalnego zależnego od czasu (rys. 3.54) [30]:

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.89)$$

gdzie: σ_m – średnia wartość naprężenia normalnego [Pa],
 σ_a – amplituda naprężenia normalnego [Pa],
 ω – częstotliwość kołowa [s^{-1}], t – czas [s].



Rys. 3.54. Przebieg i parametry siły harmoniczej

Dodatkowo definiuje się *współczynnik stałości obciążenia* [31]:

$$\chi = \frac{\sigma_m}{\sigma_a} \quad (3.90)$$

i *współczynnik amplitudy* cyklu (współczynnik asymetrii cyklu):

$$R = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (3.91)$$

Wykorzystując definicje współczynnika stałości obciążenia i współczynnika amplitudy cyklu, można wyróżnić następujące cykle:

- 1) jednostronny dodatni;
- 2) odzerowy dodatni;
- 3) dwustronny dodatni;
- 4) wahadłowy (symetryczny);
- 5) dwustronny ujemny;
- 6) odzerowy ujemny;
- 7) jednostronny ujemny.

Powyższy opis można uogólnić na przypadki zginania, skręcania i ścinania, a także ich dowolną kombinację.

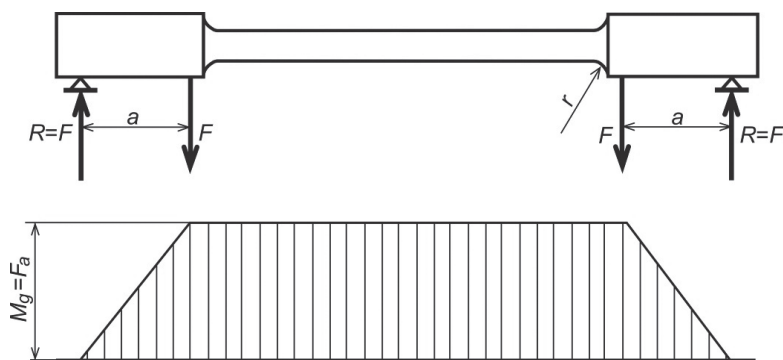
3.9.3. Wyznaczanie wytrzymałości zmęczeniowej (wykres Wöhlera – krzywa S-N materiału)

Przy obliczeniach wytrzymałościowych elementów konstrukcyjnych pracujących pod wpływem zmiennych w czasie obciążeń konieczna jest znajomość parametrów, które można wyznaczyć na podstawie badań laboratoryjnych. Typowe badania zmęczeniowe przeprowadza się na serii jednakowych próbek, wykonanych z tego samego materiału. W zależności od wyznaczanych parametrów próbki dzielą się na próbki do wyznaczenia:

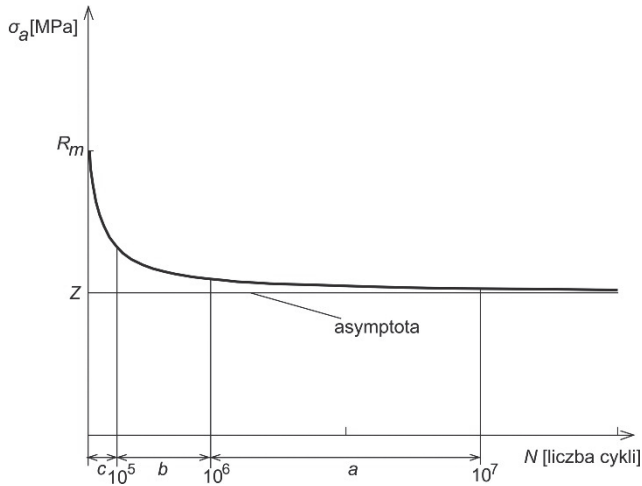
- 1) wskaźników zmęczeniowych materiału (mają najprostszy kształt);
- 2) wytrzymałości zmęczeniowej elementu konstrukcyjnego (mają kształt elementu konstrukcyjnego).

W praktyce przeprowadzane są próby zmęczeniowe proste (rozciąganie/ściskanie, zginanie, skręcanie) lub próby złożone z kilku podstawowych sposobów obciążenia (złożony stan naprężeń).

Próba zginania zmęczeniowego (zginania dwustronnego) jest realizowana według schematu przedstawionego na rys. 3.55 [32]. Próbkę obciążoną statycznie siłą F wprowadza się w ruch obrotowy. Wówczas górne włókna próbki poddane są ścisłaniu, a dolne rozciąganiu. Przejście od rozciągania do ścisłania odbywa się w trakcie jednego cyklu (cykl wahadłowy). Minimalna liczba próbek wykorzystanych w trakcie badania powinna wynosić od 8 do 12. Pierwsze przyłożone obciążenie powinno wywoływać naprężenia maksymalne poniżej wartości R_m . Kolejne próbki obciąża się tak, aby osiągnąć mniejsze wartości obciążenia maksymalnego przy jednoczesnym zwiększeniu liczby cykli do zniszczenia. Po przeprowadzonych próbach tworzy się wykres zbiorczy, nazywany wykresem Wöhlera lub krzywą S-N (rys. 3.56).



Rys. 3.55. Schemat obciążenia próbki przy zmęczeniowej próbie zginania



Rys. 3.56. Wykres Wöhlera

Na podstawie wykresu Wöhlera wyznacza się nieograniczoną wytrzymałość zmęczeniową nazywaną rzeczywistą granicą zmęczenia Z_* (*_ oznaczenie symboliczne, zależne od przypadku obciążenia, zgodnie z tab. 3.5). W przypadku opisywanej próby jest to Z_{go} .

Wartość naprężenia Z wyznacza asymptota (rys. 3.56). Na wykresie można wyróżnić trzy obszary:

- przedział wysokocyklowy, w którym powstają właściwe przelomy zmęczeniowe (brak odkształceń plastycznych);
- przedział niskocyklowy, w którym powstają przedwczesne przelomy zmęczeniowe (małe odkształcenia plastyczne);
- przedział quasi-statyczny, w którym powstają przelomy okresowego przeciążenia (duże odkształcenia plastyczne).

W praktyce wystarczającą dokładność odczytu dla stali konstrukcyjnych stanowi wartość naprężenia dla liczby cykli równej $N = 10^7$, a dla metali i stopów żelaznych $N = (2 \div 10) \cdot 10^7$ (np. stopy Al, Cu, dla których na wykresie S-N nie istnieje asymptota). Jest to tak zwana *wytrzymałość zmęczeniowa ograniczona*.

3.9.4. Wyznaczanie wytrzymałości zmęczeniowej przy cyklach niesymetrycznych (wykres Smitha, wykres Haigha)

Dla innych przypadków obciążenia schemat uzyskania krzywej Wöhlera i odpowiedniej wartości zmęczeniowej Z_* przebiega w podobny sposób jak dla zginania obustronnego, przy czym w trakcie prób utrzymywana jest zazwyczaj stała wartość σ_m (zmienia się tylko wartość σ_a). Przebieg cykli oraz oznaczenia dla różnego rodzaju obciążenia przedstawiono w tab. 3.5.

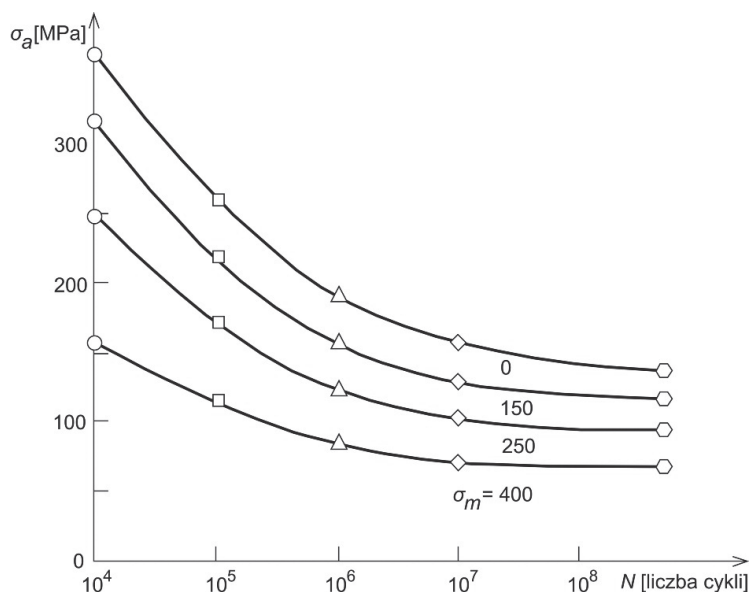
Mimo że wytrzymałość zmęczeniowa jest stałą materiałową, to zależy ona również od sposobu obciążenia.

Tabela 3.5

Oznaczenia wytrzymałości zmęczeniowej w zależności od rodzaju cyklu i obciążenia

Obciążenie \ Cykl	Jednostronny dodatni	Dodatni odzerowy	Wahadłowy	Ujemny odzerowy	Jednostronny ujemny
Rozciągające	Z_r	Z_{rj}	Z_{rc}	–	–
Ściskające	–	–	Z_{rc}	Z_{cj}	Z_c
Zginające	Z_g	Z_{gj}	Z_{go}	Z_{gj}	Z_g
Skręcające	Z_s	Z_{sj}	Z_{so}	Z_{sj}	Z_s

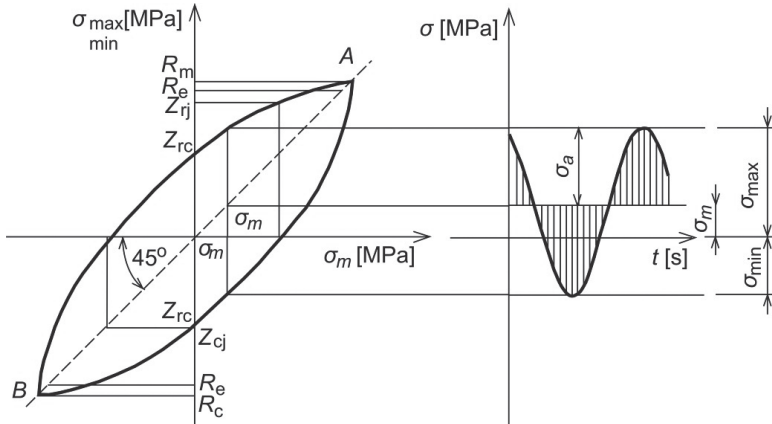
Badania wykazują, że istnieje wpływ wielkości naprężeń średnich na wartość wytrzymałości zmęczeniowej. Dla większych wartości σ_m (rys. 3.57) następuje obniżenie wartości wytrzymałości zmęczeniowej.

Rys. 3.57. Krzywe S–N stali konstrukcyjnej dla $\sigma_m = \text{const}$ przy rozciąganiu

Wyniki pomiarów przeprowadzonych dla $\sigma_m = \text{const}$ umożliwiają wyznaczenie wartości σ_{min} , σ_{max} (dla danego σ_m), przy których nie nastąpi zniszczenie próbki, a ich zestawienie można zaprezentować w postaci wykresu Smitha, sporządzanego we współrzędnych $\sigma_m = \sigma_m(\sigma_{max/min})$ (rys. 3.58).

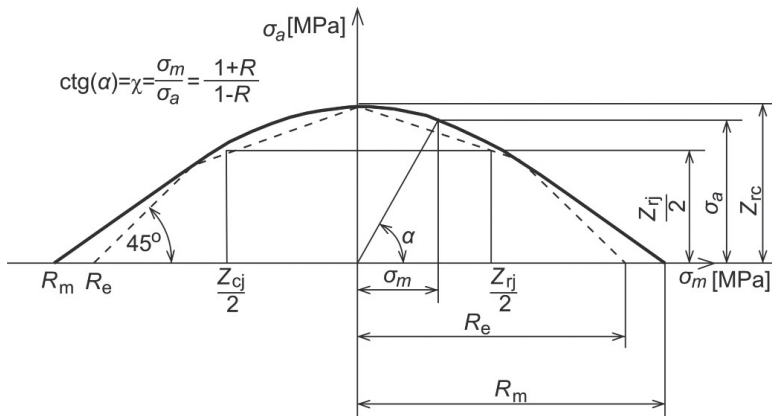
Istnieje możliwość wykreślenia uproszczonego wykresu Smitha, który w przeciwieństwie do pełnego wykresu Smitha nie wymaga przeprowadzania dużej liczby kosztownych i długotrwałych prób laboratoryjnych. Do konstrukcji uproszczonego wykresu Smitha wystar-

czy znajomość granicy plastyczności R_e , wytrzymałości zmęczeniowej dla cyklu wahadłowego Z_o (przy wahadłowym rozciąganiu jest to Z_{rc}) oraz odzerowej wytrzymałości zmęczeniowej Z_j . Dodatkowo, dla materiałów o symetrycznych charakterystykach wytrzymałościowych (np. stale konstrukcyjne) wystarczy wykreślenie połówki wykresu uproszczonego, tj. dla $\sigma_m \geq 0$. W większości przypadków dokładność uzyskana za pomocą odczytu z uproszczonego wykresu Smitha jest wystarczająca. Dlatego w praktyce można użyć tego wykresu do wyznaczenia przybliżonej wartości zmęczeniowego współczynnika bezpieczeństwa.



Rys. 3.58. Wykres Smitha

Prostszy od wykresu Smitha, umożliwiający łatwiejszą analizę wytrzymałościową doboru naprężeń dopuszczalnych, jest wykres Haigha (rys. 3.59). Każdemu punktowi na krzywej odpowiada określona wartość współczynnika stałości obciążenia. Podobnie jak wykres Smitha, wykres Haigha może zostać uproszczony, co obrazuje linia przerywana na rys. 3.59. Wykres Haigha powstaje z części wykresu Smitha (rys. 3.58) obróconego o 45° .



Rys. 3.59. Pełny (linia pogrubiona) i uproszczony (linia przerywana) wykres Haigha

3.9.5. Zjawiska wpływające na zmęczenie materiału

Wytrzymałość zmęczeniowa elementu konstrukcyjnego może zależeć od wielu czynników [9, 10, 14–16, 19]. Poniżej omówione zostaną niektóre z nich. W trakcie eksploatacji maszyn często dochodzi do nałożenia się szeregu zjawisk wpływających na trwałość zmęczeniową danego elementu konstrukcyjnego.

Wpływ karbu

Uwzględnienie wpływu karbu (koncentracji naprężeń) dla elementów konstrukcyjnych działających pod zmiennym obciążeniem jest bardzo istotne. Dla niektórych prędkości zmian naprężeń w elemencie konstrukcyjnym obserwuje się przesunięcie granicy plastyczności w okolice granicy wytrzymałości na rozciąganie. Oznacza to, że materiał plastyczny może ulec kruchemu pękaniu. Teoretyczny wpływ zjawiska karbu opisuje się za pomocą współczynnika kształtu α_k , definiowanego jako:

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad \text{lub} \quad \alpha_k = \frac{\tau_{max}}{\tau_n} \quad (3.92)$$

gdzie: σ_{max}, τ_{max} – największe naprężenia uwzględniające zmiany kształtu przedmiotu,
 σ_n, τ_n – naprężenia nominalne obliczone za pomocą konwencjonalnych wzorów wytrzymałościowych dla najbardziej osłabionego pola przekroju przedmiotu.

Doświadczenie pokazuje, że w rzeczywistości materiały nie są tak wrażliwe na występowanie karbu, jakby to wynikało z wartości współczynnika α_k . W przypadku określania wpływu koncentracji naprężeń na wytrzymałość zmęczeniową wprowadza się tzw. zmęczeniowy współczynnik działania karbu lub – krócej – współczynnik działania karbu β_k , definiowany jako:

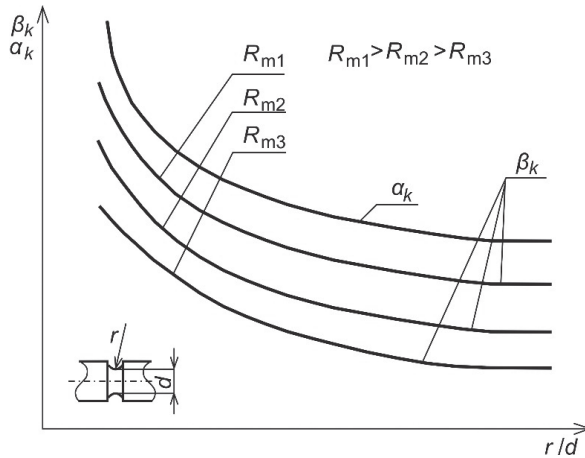
$$\beta_k = \frac{Z_{bk}}{Z_k} \quad (3.93)$$

gdzie: Z_{bk} – wytrzymałość zmęczeniowa próbek gładkich bez karbu,
 Z_k – wytrzymałość zmęczeniowa próbek gładkich z karbem.

Współczynniki α_k i β_k określają wrażliwość materiału na działanie karbu, które w sposób syntetyczny określa współczynnik wrażliwości η , definiowany jako:

$$\eta = \frac{\beta_k - 1}{\alpha_k - 1} \quad (3.94)$$

Dla materiałów o liniowej i idealnie sprężystej charakterystyce materiałowej $\alpha_k = \beta_k$, więc $\eta = 1$ (np. szkło). Dla materiałów niewrażliwych na zjawisko karbu $\beta_k = 1$, więc $\eta = 0$ (np. żeliwo szare). Dla większości stali konstrukcyjnych $\eta \in (0,6 \div 0,8)$, przy czym większym η cechują się stale o dużej wytrzymałości.



Rys. 3.60. Zależność współczynników α_k i β_k od rozmiaru karbu dla próbek cylindrycznych wykonanych ze stali przy próbie zginania obrotowego

Na rys. 3.60 przedstawiono zależność współczynników α_k i β_k od rozmiaru karbu dla próbek cylindrycznych wykonanych ze stali i próby zginania obrotowego. Jak widać, zachodzi zależność $\alpha_k > \beta_k$, a materiały o większej wytrzymałości są bardziej wrażliwe na działanie karbu.

Wpływ środowiska korozyjnego

Zjawisko zmęczenia korozyjnego zachodzi także wskutek działania korozji i zmiennych naprężeń. Zmienne naprężenia w środowisku korozyjnym powodują powstanie ostrych wżerów wypełnionych produktami korozji. Korozja zmęczeniowa prowadzi do znacznego obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej oraz braku jawnej asymptoty, do której dąży wartość naprężenia wraz ze wzrostem liczby cykli. Wielkością charakteryzującą wpływ środowiska na wytrzymałość zmęczeniową stali jest współczynnik odporności cyklicznej β , definiowany jako:

$$\beta = \frac{Z_B}{Z_{BP}} \quad (3.95)$$

gdzie: Z_B – granica zmęczenia w środowisku korozyjnym,

Z_{BP} – granica zmęczenia w powietrzu.

W przypadku, gdy aktywność środowiska korozyjnego zależy od temperatury, rozwój korozji zmęczeniowej jest związany z temperaturą pracy danego elementu konstrukcyjnego.

Badanie korozji zmęczeniowej prowadzi się na podobnych stanowiskach jak w przypadku badań zmęczenia materiałów w powietrzu. Wprowadzane są jedynie adaptacje umożliwiające umieszczenie próbki w środowisku korozyjnym.

Wpływ skali

Na podstawie badań doświadczalnych ustalono, że wraz ze wzrostem wymiarów próbek (o takich samych kształtach i wymiarach) wytrzymałość zmęczeniowa spada. Fakt ten tłumaczy się tym, że przy założeniu jednakowej gęstości rozłożenia mikropęknięć w próbkach o większej objętości będzie ich więcej, co zwiększa prawdopodobieństwo pęknięć zmęczeniowych. Dodatkowo, elementy o małych wymiarach cechują się zazwyczaj lepszymi własnościami mechanicznymi uzyskanymi w trakcie procesu technologicznego.

Wytrzymałość zmęczeniową ustala się na małych próbkach. W celu uwzględnienia rzeczywistych rozmiarów elementu wprowadza się współczynnik skali β_s , definiowany jako:

$$\beta_s = \frac{Z_d}{Z_{d_0}} \quad (3.96)$$

gdzie: Z_d – wytrzymałość zmęczeniowa próbki o średnicy d ,

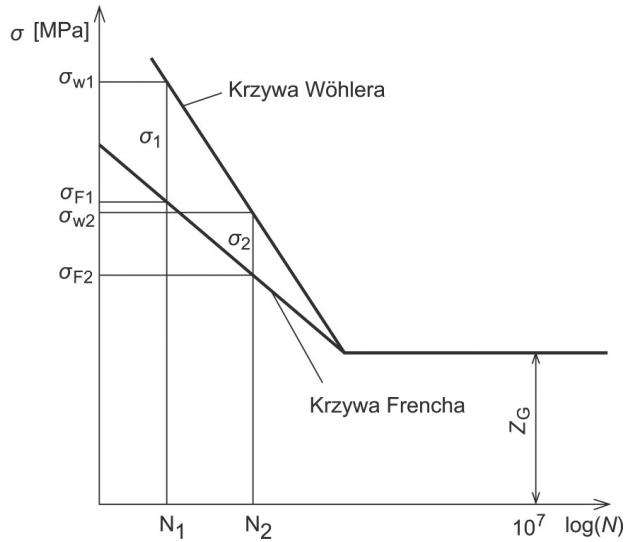
Z_{d_0} – wytrzymałość zmęczeniowa próbki o średnicy d_0 ($d > d_0$).

Wpływ krótkotrwałych przeciążeń

Podczas eksploatacji maszyny może się zdarzyć, że na skutek chwilowego przeciążenia wartość naprężenia przekroczy chwilowo wartość wytrzymałości zmęczeniowej materiału (krótkotrwałe przeciążenie). Chwilowe przeciążenia obniżają wytrzymałość zmęczeniową elementu konstrukcyjnego.

W celu wyznaczenia zależności pomiędzy chwilowymi przeciążeniami a wytrzymałością zmęczeniową przeprowadza się specjalne próby.

Próbkę obciąża się tak, aby wywołać w niej naprężenia σ_1 w zakresie pomiędzy wartością granicy wytrzymałości ($\sigma_{max} = \sigma_{w1}$) a wartością ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej dla N_1 cykli ($\sigma_{min} = Z_G$). Po osiągnięciu N_1 cykli próbę kontynuuje się aż do 10^7 cykli przy naprężeniu równym Z_G . Jeżeli próbka nie pęknie, uważa się, że amplituda przeciążenia nie miała wpływu na zmianę wartości wytrzymałości zmęczeniowej. Jeżeli próbka pęknie wcześniej niż przy $N = 10^7$ cykli, próbę powtarza się dla zmniejszonej amplitudy przeciążenia. W wyniku tych prób wyznacza się wartość amplitudy przeciążenia σ_{F1} , która nie spowoduje uszkodzenia próbki przy naprężeniu Z_G . Następnie bada się przeciążenia dla liczby cykli N_2 , itd. Zbiór wszystkich wartości σ_{Fi} tworzy tzw. krzywą Frencha (rys. 3.61). Obszar pomiędzy krzywymi Wöhlera i Frencha obejmuje przeciążenia obniżające granicę wytrzymałości. Obszar pod krzywą Frencha obejmuje wszystkie przeciążenia niemające wpływu na granicę zmęczenia.



Rys. 3.61. Krzywe Frencha i Wöhlera we współrzędnych logarytmicznych

Wpływ stanu powierzchni

Wytrzymałość zmęczeniowa elementu konstrukcyjnego jest tym większa, im gładsza jest jego powierzchnia. Wpływ stanu powierzchni elementu opisuje współczynnik stanu powierzchni β_p , określony wzorem:

$$\beta_p = \frac{Z_{gl}}{Z_p} \quad (3.97)$$

gdzie: Z_{gl} – wytrzymałość zmęczeniowa próbki o gładkiej (polerowanej) powierzchni,

Z_p – wytrzymałość zmęczeniowa próbki o badanym stanie powierzchni.

3.9.6. Przygotowanie raportu z badań

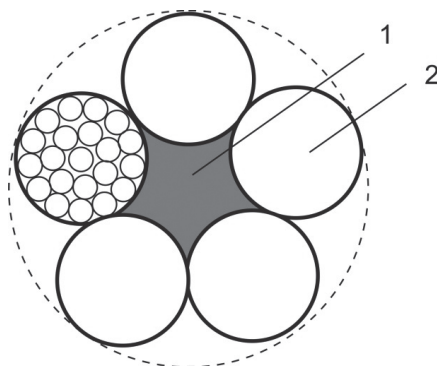
W raporcie z badań należy podać:

- 1) rodzaj materiału próbek oraz stosowane metody ulepszenia lub zmiany jego powierzchni (obróbka cieplna, obróbka cieplno-chemiczna itp.);
- 2) sposób pobrania próbek i miejsca ich pobrania w materiale badanym lub elemencie konstrukcyjnym;
- 3) kształt, wymiary i gładkość powierzchni badanych próbek;
- 4) charakterystykę maszyny wytrzymałościowej stosowanej do badań;
- 5) charakterystykę ilościową obciążenia (naprężenie maksymalne, amplitudę cyklu naprężeń, współczynnik asymetrii cyklu, częstotliwość zmiany obciążenia);
- 6) rodzaj zastosowanego obciążenia mechanicznego;
- 7) rodzaj chłodzenia próbki;
- 8) przerwy stosowane podczas badań zmęczeniowych;
- 9) wyniki badań (wykres Wöhlera, wykres Smitha, wykres Haigha).

3.10. Badanie lin stalowych

3.10.1. Budowa lin

Lina stalowa składa się z drutów ocynkowanych lub nieocynkowanych, które są zwijane wokół rdzenia w splotki (rys. 3.62). Splotka zawiera warstwy drutów ułożonych wokół rdzenia splotki. Wymiarem charakterystycznym liny jest koło opisane promieniem liny. Wymiarem charakterystycznym splotki jest koło opisane promieniem splotki.



Rys. 3.62. Przekrój liny stalowej: 1 – rdzeń liny, 2 – splotka

Do produkcji lin wykorzystuje się: druty stalowe, włókna roślinne lub syntetyczne (do produkcji rdzenia) oraz środki zabezpieczające przed korozją, a także zapewniające trwałość rdzenia liny [13].

Produkcja liny stalowej przebiega w czterech etapach:

- 1) nawijanie drutu na szpule;
- 2) zwijanie splotek;
- 3) produkcja rdzenia liny;
- 4) zwijanie liny.

Właściwości mechaniczne drutu liny są określane za pomocą następujących wielkości: wytrzymałości na rozciąganie R_m [N/mm²], względnego wydłużenia procentowego po zerwaniu A [%], minimalnej liczby przegięć N_b [-] i minimalnej liczby skręceń N_t [-]. W przypadku drutów ocynkowanych dodatkowo wyznacza się właściwości mechaniczne powłoki [76].

Rdzeń liny służy jako podpora dla splotek, a ponadto jest zbiornikiem środków smarujących oraz wspomaga utrzymanie właściwego kształtu liny. Rdzeń liny może być wykonany z drutu stalowego lub z włókna roślinnego (naturalnego, np. bawełna, juta, szał) albo syntetycznego.

W zależności od materiału liny stosuje się następujące oznaczenia:

- FC – rdzeń z włókien naturalnych lub syntetycznych;
- NFC – rdzeń z włókien naturalnych;

- SFC – rdzeń z włókien syntetycznych;
 WC – rdzeń z drutów stalowych;
 IWRC – rdzeń w postaci linki z drutów stalowych o dowolnej konstrukcji;
 WSC – rdzeń w postaci splotki o takiej samej konstrukcji jak splotki liny (stosowany w linach o średnicy do 13 mm i w linach wielowarstwowych);
 SPC – rdzeń wykonany ze stałego polimeru.

W odróżnieniu od liny z rdzeniem włókiennym lina z rdzeniem stalowym cechuje się większą sztywnością (mniejszą giętkością), większą odpornością na naciski poprzeczne, większą siłą zrywającą oraz może być stosowana do pracy w wysokich temperaturach.

W porównaniu z liną z rdzeniem stalowym lina z rdzeniem naturalnym charakteryzuje się większą giętkością (mniejszą sztywnością) i może pracować jedynie w temperaturze do 200°C (powyżej tej temperatury własności liny ulegają pogorszeniu). Jeżeli rdzeń takiej liny jest nasycony smarem, to pełni on funkcję zbiornika smaru, który podczas eksploatacji wydziela smar zabezpieczający druty i splotki przed korozją oraz ścieraniem. Rdzeń z włókna naturalnego powinien mieć równomierną średnicę na całej swojej długości, aby zmniejszyć zużycie liny wskutek ścierania w miejscach zgrubienia włókien.

3.10.2. Klasyfikacja lin stalowych

Liny stalowe są klasyfikowane ze względu na:

- 1) kształt przekroju poprzecznego liny: *okrągły i płaskie*;
- 2) kształt przekroju poprzecznego splotek: *okrągły, trójkątny, owalny, prostokątny*;
- 3) kształt przekroju poprzecznego drutów: *okrągły lub kształtowy*;
- 4) liczbę zwicha splotek i linisk (wielokrotność zwicha liny): *liny jednozwichowe* (jednosplotkowe, spiralne), *liny dwuzwichowe* (druty liny są zwichane w splotki, które następnie są zwichane w linę), *liny trózzwichowe* (druty liny są zwichane w splotki, potem splotki są zwichane w liniska, które na końcu są zwichane w linę), *liny wieloliniskowe*;
- 5) liczbę warstw splotek: *liny z jedną warstwą splotek, liny z dwiema warstwami splotek, liny z trzema warstwami splotek*;
- 6) liczbę warstw drutów w splotce: *liny o splotkach jednowarstwowych, liny o splotkach dwuwarstwowych, liny o splotkach trzywarstwowych, liny o splotkach czterowarstwowych*;
- 7) styk drutów w splotce: *liny o punktowym styku drutów w splotkach* (warstwy są ułożone pod odmiennymi kątami), *liny o liniowym styku drutów w splotkach* (warstwy są ułożone pod jednakowym kątem), *liny o punktowo-liniowym styku drutów w splotkach, liny o powierzchniowym styku drutów w splotkach*;
- 8) wzajemny kierunek zwicha splotek w linę i kierunek drutów w splotce: *liny przeciwwzwichowe prawe Z/s* (kierunek zwicha liny jest prawy, kierunek zwicha drutów w splotkę zaś – lewy), *liny przeciwwzwichowe lewe S/z* (kierunek zwicha liny jest lewy, kierunek zwicha drutów w splotkę zaś – prawy), *liny współzwichowe prawe Z/z* (kierunek zwicha liny jest prawy i kie-

runek zwicia drutów w spłotkę jest prawy), liny współzwite lewe S/s (kierunek zwicia liny jest lewy i kierunek zwicia drutów w spłotkę jest lewy); liny przeciwwzite są nazywane także *linami o zwiciu zwykłym*, a liny współzwite – *linami o zwiciu Langa*;

- 9) materiał rdzenia: *stalowy*, *roślinny* lub *syntetyczny*;
- 10) naprężenia wewnętrzne w linie: *liny nieodprężone* (po przecięciu spłotki druty nie zachowują swojego pierwotnego położenia) i *liny odprężone* (po przecięciu spłotki druty zachowują swoje pierwotne położenie);
- 11) odkrętność liny: *liny odkrętne* (mają tendencję obracania się wokół własnej osi przy swobodnym zawieszeniu ciężaru) i *liny nieodkrętne* (nie mają tendencji obracania się wokół własnej osi przy swobodnym zawieszeniu ciężaru).

Skok zwicia liny określa odległość pomiędzy powtarzającymi się nawinięciami drutu/spłotki względem środka spłotki/rdzenia liny.

Liny o powierzchniowym styku drutów w spłotce (liny kompaktowe) powstają w wyniku promieniowego odkształcenia spłotek na zimno. Zabieg ten odbywa się poprzez przeciąganie, walcowanie lub zakuwanie. Pozwala to otrzymać spłotki bezszczelinowe, w których styk liniowy zmienia się w styk powierzchniowy. Do zalet lin kompaktowych zaliczają się: większa odporność na naciski poprzeczne, mniejszy moment odkrętny, większa sztywność i większa odporność na zużycie.

Jeżeli poszczególne warstwy spłotki składają się z drutów o takiej samej średnicy, to taka konstrukcja jest nazywana *Seale* (S). Jeżeli warstwa zewnętrzna spłotki składa się z drutów o różnych średnicach, to jest nazywana *Warrington* (W). Liny zawierające konstrukcje *Seale* i *Warrington* określa się jako *Warrington–Seale* (WS). Spłotki liny zawierające druty wypełniające są określane jako *Filler* (F).

Liny współzwite są bardzo elastyczne i charakteryzują się większą wytrzymałością zmęczeniową w porównaniu z linami przeciwwzitymi. Jednak w praktyce zastosowanie lin współzwitych jest ograniczone. Wynika to z faktu, że są one linami odkrętnymi, które po zluźowaniu tworzą pętle (bardzo niekorzystne zachowanie liny stalowej). Z tego względu mogą one być stosowane wyłącznie do podnoszenia ciężaru w prowadnicach.

Spłotki lin mogą być wykonane bez rdzenia jedynie w przypadku, gdy liczba drutów w spłotce nie przekracza czterech. Powyżej tej liczby konieczne jest zastosowanie rdzenia. Z kolei liczba warstw drutów w spłotce w linie z rdzeniem włókiennym (roślinnym lub syntetycznym) nie może być większa niż trzy.

Lina odprężona po poprzecznym przecięciu nie ulega samorozkręcaniu i samorozplątaniu, a jej rozkręcona spłotka nie przyjmuje postawy „wichrowej”. Linę odprężoną można także sprowadzić do położenia pierwotnego, tzn. zwinąć z powrotem. W linie odprężonej uszkodzone i pęknięte druty dalej przenoszą obciążenia, nie wyskakując ze spłotek.

W procesie przygotowania drutu stalowego (ciągnięcie) powstają w nim naprężenia własne, a dodatkowo dochodzą naprężenia spowodowane odkształceniami powstałymi wskutek zwijania drutów w spłotkę, a potem spłotek w linę. W linach jednozwitych wszystkie druty

oprócz środkowego (rdzenia liny) są spiralami, tzn. mają pojedynczą krzywiznę. W linach wielozwitych liczba krzywizn wzrasta, co powoduje zwiększenie naprężeń wewnętrznych. W celu ograniczenia tych naprężeń podczas produkcji splotek i lin przyjmuje się kąt zwicia w zakresie $12 \div 20^\circ$. W linach odprężonych naprężenia własne i naprężenia wewnętrzne są usuwane podczas zabiegu odprężania, w linach nieodprężonych zaś naprężenia te pozostają.

Zabieg odprężania lin jest realizowany sposobem mechanicznym lub cieplnym (rzadziej stosowany). Sposób mechaniczny realizuje się na deformatorach, które tak odkształcają splotki i liny, że te po rozcięciu się nie rozkręcają. Sposób cieplny polega na niskotemperaturowym odpuszczaniu lin stalowych (indukcyjne lub oporowe nagrzewanie prądem). Sposób cieplny nie może być stosowany w przypadku lin z rdzeniem włókiennym i lin mających druty ocynkowane.

Produkują się liny zamknięte i półzamknięte, które mają gładką powierzchnię zewnętrzną. Powstają one w procesie zginięcia, który zachodzi po operacji składania liny. Liny te charakteryzują się dużym wypełnieniem przekroju poprzecznego (dlatego cechują się dużą sztywnością poprzeczną), niemal zerowym momentem odkrętu i dużym przekrojem drutów znajdujących się w warstwie zewnętrznej. Sprzyja to zwiększeniu trwałości liny, gdyż opóźnione jest działanie korozji i ścierania oraz zmniejszone są naciski jednostkowe na gładkie powierzchnie zewnętrzne.

Podczas dobierania liny należy pamiętać, że:

- 1) zwiększanie liczby drutów dotykających powierzchni rowka bębna powoduje zmniejszenie nacisków jednostkowych w tych drutach, co zwiększa wytrzymałość liny;
- 2) w przypadku konieczności zmniejszenia zużycia liny spowodowanego jej ścieraniem należy stosować linę o splotkach kształtowych;
- 3) liny o liniowym styku drutów cechują się wyższą trwałością eksploatacyjną (są bardziej odporne na zużycie, spowodowane głównie zmęczeniem) w porównaniu z linami o punktowym styku drutów, w których zachodzi wtórne zgięcie drutów, które dodatkowo je obciąża;
- 4) liny jednozwite mają dużą sztywność i pracują głównie na rozciąganie, dlatego nie można ich stosować do pracy na bębnach.

3.10.3. Badanie lin stalowych

Próba rozciągania liny stalowej

Próba rozciągania jest podstawowym badaniem pozwalającym na wyznaczenie siły zrywającej linę. Próbę tę należy przeprowadzić zgodnie z normą PN-EN 12385-1+A1:2009 [40].

Przed badaniem należy określić wymiary charakterystyczne liny. Wyznaczenie wymiarów okrągłej lub płaskiej liny stalowej należy przeprowadzić na prostym odcinku liny nieobciążonej lub obciążonej siłą, która nie przekracza 5% wartości nominalnej siły zrywającej, w dwóch miejscach oddalonych od siebie o nie mniej niż 1 m. W przypadku badania liny okrągłej należy w wyznaczonych miejscach pomiaru zmierzyć w dwóch prostopadłych kie-

runkach jej średnicę, która powinna być średnicą koła opisanego. Urządzenie pomiarowe powinno obejmować co najmniej dwie splotki. W przypadku badania liny płaskiej należy zmierzyć w wyznaczonych miejscach pomiaru jej grubość i szerokość. Zmierzone wymiary są nazywane wymiarami nominalnymi liny.

W celu wyznaczenia nośnego przekroju poprzecznego należy obliczyć sumę wszystkich przekrojów poprzecznych drutów liny.

Siły przenoszone przez liny można określać trzema metodami:

Metoda 1: wyznaczenie zmierzonej siły zrywającej linę F_m

Do badania należy wykorzystać próbki liny, których zakończenia są zabezpieczone przed widocznym rozplataniem się. Próbkę trzeba zamocować w odpowiednio przygotowanym oprzyrządowaniu maszyny wytrzymałościowej, które zapewni obciążenie wszystkich drutów liny stalowej. Próbkę należy obciążyć siłą rozciągającą.

Przyrost siły po osiągnięciu 80% minimalnej wartości siły zrywającej F_{min} powinien wynosić nie więcej niż $0,005 \cdot F_{min}$ na sekundę. Przed osiągnięciem siły obciążenia równej $0,4 \cdot F_{min}$ można zastosować zmienne obciążenia. Próbkę należy rozciągać do jej zerwania.

Wynik badania uznaje się za pozytywny, jeżeli wartość zmierzonej siły zrywającej linę F_m jest równa lub większa od wartości minimalnej siły zrywającej linę F_{min} , podanej w atęście wytwórcy. Próbkę należy unieważnić, jeżeli zerwanie liny nastąpiło przy sile mniejszej, a odległość między miejscem zerwania liny a uchwytem maszyny jest mniejsza od 6-krotnej średnicy liny.

Metoda 2: wyznaczenie zmierzonej sumarycznej siły zrywającej $F_{e.min}$

W celu wyznaczenia sumarycznej siły zrywającej $F_{e.min}$ należy przebadać poszczególne rodzaje drutów pobrane z liny, zgodnie z PN-EN 10264-1:2005 [37], i wyznaczyć zrywające je siły. Następnie dla każdego rodzaju drutu należy obliczyć siłę zrywającą jako iloczyn wyznaczonej średniej siły zrywającej i liczby takich drutów w linie. Sumaryczną siłę zrywającą $F_{e.min}$ należy obliczyć jako sumę wszystkich sił zrywających wyznaczonych dla poszczególnych rodzajów drutu. Wynik badania uznaje się za pozytywny, jeżeli wartość zmierzonej sumarycznej siły zrywającej jest równa lub większa od wartości minimalnej sumarycznej siły zrywającej $F_{e.min}$, podanej w atęście wytwórcy.

Metoda 3: wyznaczenie obliczonej siły zrywającej $F_{m.c}$

W celu wyznaczenia obliczonej siły zrywającej $F_{m.c}$ należy przebadać pojedyncze druty liny, zgodnie z normą [37], i wyznaczyć zmierzoną sumaryczną siłę zrywającą $F_{e.min}$, zgodnie z metodą 2. Uzyskaną wartość należy pomnożyć przez współczynnik strat zwicia k lub częściowy współczynnik strat zwicia otrzymany w wyniku badań.

Jeżeli uzyskana wartość $F_{m.c}$ nie osiąga wartości minimalnej siły zrywającej linę F_{min} , to należy przeprowadzić jeszcze jedno badanie zgodnie z metodą 1.

Wynik badania uznaje się za pozytywny, jeżeli wartość obliczonej siły zrywającej $F_{m,c}$ jest równa lub większa od wartości minimalnej siły zrywającej F_{min} , podanej w atescie wytwórcy.

Uwagi dotyczące badania drutów liny

Właściwości mechaniczne drutów należy wyznaczać na podstawie wytycznych podanych w normie [37]. Do właściwości tych zaliczają się: wytrzymałość na rozciąganie R_m (statyczna próba rozciągania), względne wydłużenie procentowe po rozerwaniu A (statyczna próba rozciągania), minimalna liczba przegięć N_b (próba przeginania dwukierunkowego), minimalna liczba skręceń N_t (próba skręcania jednokierunkowego).

W przypadku wyznaczania właściwości drutu ocynkowanego należy dodatkowo określić przyczepność powłoki ocynkowanej do podłoża (drutu) poprzez przeprowadzenie próby nawijania drutu na cylindryczny trzpień.

Próbie przeginania dwukierunkowego należy przeprowadzać na stanowisku do przeginania, wyposażonym w dwa wałki zginające o promieniu zależnym od średnicy badanego drutu (por. p. 3.11.4). Podczas badania próbkę należy przeginać o kąt 90° na przemian w kierunkach przeciwnych bez przyspieszeń (stała prędkość przeginania). Za jedno przegięcie należy przyjąć przegięcie o kąt 90° od pozycji wejściowej (pionowej) oraz powrót do tej pozycji. Kolejne przegięcie należy wykonać w przeciwnym kierunku. Wyznaczona liczba przegięć drutu N_b pozwala określić podatność drutu na odkształcenia plastyczne oraz ujawnić lokalne wady materiałowe. Podczas wielokrotnego przeginania ujawnia się *efekt Bauschinger*a, polegający na nagrzewaniu drutu oraz przemieszczaniu się jego osi obojętnej.

Próbie skręcania jednokierunkowego przeprowadza się na skręcarce, która pozwala na skrócenie próbki wokół osi do momentu jej pęknięcia. Podczas próby skręcania próbka jest obciążona osiową siłą rozciągającą, która powinna być równa 2% wartości siły zrywającej drut. Uzyskana liczba pełnych obrotów oraz rodzaj powierzchni złomu drutu skręconego pozwalają na wnioskowanie o właściwościach plastycznych drutu.

Do badania drutów lin wielozwitych należy pobrać wszystkie rodzaje spletek znajdujących się w warstwach i rdzeniu. W przypadku, gdy w jednej warstwie spletek liny jest więcej niż osiem spletek o takiej samej średnicy i konstrukcji, do badania należy pobrać dwie spletki o takiej samej średnicy i konstrukcji.

Do badania drutów lin jednozwitych należy pobrać wszystkie grupy drutów, przy czym każda grupa powinna zawierać druty o jednakowym rodzaju i wymiarze. Należy wybrać 25% drutów z każdej grupy, ale nie mniej niż trzy.

Wyznaczenie wydłużenia liny

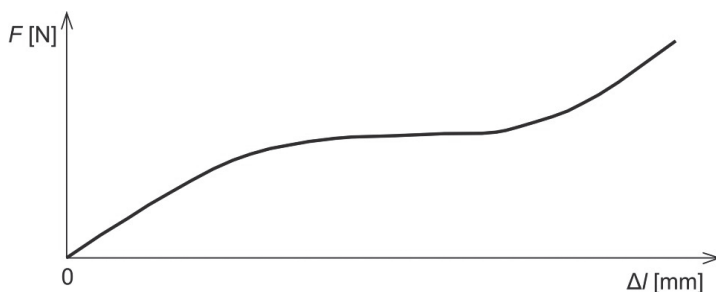
Podczas wydłużania liny jej całkowite odkształcenie jednostkowe ε_c jest sumą odkształcenia sprężystego ε_e i plastycznego (trwałego) ε_p :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{R_m}{n_b \cdot E_L} + \varepsilon_p \quad (3.98)$$

gdzie: R_m – wytrzymałość na rozciąganie,
 n_b – współczynnik bezpieczeństwa,
 E_L – moduł sprężystości liny.

Charakterystyka wydłużenia liny zawiera trzy charakterystyczne przedziały (rys. 3.63):

- 1) narastania wydłużenia liny;
- 2) wolnego narastania wydłużenia liny;
- 3) intensywnego narastania wydłużenia liny, w którym dochodzi do jej zerwania.



Rys. 3.63. Charakterystyka rozciągania liny

Należy zwrócić uwagę, że moduł sprężystości liny E_L jest mniejszy od modułu sprężystości drutów tworzących linę. Ze względu na nieliniową charakterystykę rozciągania moduł sprężystości liny powinien zostać obliczony jako styczny lub sieczny moduł sprężystości.

Wyznaczenie momentu odkrętu liny

Moment odkrętu liny powstaje na skutek śrubowego ułożenia drutów i splotek liny, która jest poddawana rozciąganiu. Moment ten zależy od siły rozciągającej, technologii wykonania liny oraz naprężeń wewnętrznych w drutach liny.

Pomijając wpływ siły tarcia pomiędzy drutami i splotkami liny oraz wpływ naprężeń wewnętrznych, teoretyczny moment odkrętu M_0 liny okrągłosplotkowej o punktowym lub liniowym styku drutów oblicza się z zależności:

$$M_0 = N \cdot (M_s + M_d) \quad (3.99)$$

gdzie: M_s – moment odkrętu wywołany przez splotkę,
 M_d – moment odkrętu wywołany przez drut splotki,
 N – liczba splotek w linie.

Badanie zmęczeniowe liny

W linie poddanej obciążeniom zmiennym w czasie powstają naprężenia zmęczeniowe, które prowadzą do zmęczenia drutów i ich pęknięcia. Liczba cykli zmian obciążenia, które może przenieść lina, nie ulegając zerwaniu, jest nazywana trwałością zmęczeniową liny.

Do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej liny najczęściej wykorzystuje się następujące badania, realizowane przy działaniu rozciągającej siły statycznej lub dynamicznej (pulsującej):

- 1) próba z przegięciem jednokierunkowym (jednorolkowe/wielorolkowe oraz z ruchem powrotnym liny) – zginanie liny od stanu wyprostowanego do stanu zgiętego i powrót do stanu wyprostowanego;
- 2) próba z przegięciem dwukierunkowym (jednorolkowe/wielorolkowe oraz z ruchem powrotnym rolek) – zginanie liny od stanu wyprostowanego do stanu zgiętego i powrót do stanu wyprostowanego z następnym zginaniem liny w kierunku przeciwnym i powrotem do stanu wyprostowanego;
- 3) próba obrotu liny wokół własnej osi podczas badań;
- 4) próba zginania obrotowego (wynikiem jest wykres Wöhlera).

Badanie liny na poprzeczne odkształcenie

Podczas nawijania liny (szczególnie wielowarstwowej) na bęben następuje odkształcenie przekroju poprzecznego, spowodowane działaniem sił ściskających. Odkształcenie to oblicza się na podstawie znajomości nacisku liny q na bęben o średnicy D z zależności:

$$q = \frac{2 \cdot F}{D} \quad (3.100)$$

gdzie: F – maksymalna siła naciągnięcia liny.

Odkształcenie przekroju poprzecznego liny jest zależne od technologii jej wykonania, jej konstrukcji i rodzaju rdzenia.

Wyznaczenie giętkości liny

Giętkością liny nazywa się jej zdolność do ugięcia pod wpływem przyłożonego ciężaru. Giętkość liny jest odwrotnością sztywności. Liny z rdzeniem włókiennym cechują się większą giętkością (mniejszą sztywnością) w porównaniu z linami mającymi rdzeń stalowy.

Wyznaczenie giętkości liny polega na przymocowaniu jednego jej końca do bębna i obciążeniu drugiego końca ciężarem stałym. Miarę giętkości stanowi wartość zwisu (im większy, tym lina jest bardziej giętka).

3.10.4. Zawiesia

W praktyce wykorzystuje się liny mające z obu końców pętlice. Liny takie są nazywane zawieszami. Można je podzielić na: jedno-, dwu-, trzy- i czterocięgnowe; jedno- i dwupętłowe oraz zawiesia o obwodzie zamkniętym [34, 42].

Elementy mocujące zawiesie (hak lub ogniwo) powinny być dobrane tak, aby przenosiły obciążenia równe nominalnej wytrzymałości liny [36].

Badanie wytrzymałościowe zawiesi polega na określeniu dopuszczalnego obciążenia roboczego (DOR). Zgodnie z normą PN-EN 13414 [41] DOR jest określane dla zawiesi jednociegnowych z zależności:

$$DOR = \frac{F_{min} \cdot K_T}{Z_p \cdot g} \quad (3.101)$$

dla zawiesi wielociegnowych zaś:

$$DOR = \frac{F_{min} \cdot K_T \cdot K_L}{Z_p \cdot g} \quad (3.102)$$

gdzie: F_{min} – minimalna siła zrywająca (wyznaczana z próby rozciągania statycznego),

K_T – współczynnik sprawności zakończeń liny,

Z_p – współczynnik roboczy ($Z_p = 5$),

g – współczynnik odniesienia masy do siły ($g = 9,80665$),




K_L – współczynnik ciągną uwzględniający liczbę ciągów i kąt do pionu.

3.10.5. Przykłady oznaczeń i konstrukcji lin




Przykłady oznaczeń i konstrukcji lin podano w tab. 3.6 [3].

Tabela 3.6

Przykłady lin

Schemat	Konstrukcja	Opis
	6×7	Konstrukcja sześcioplotowa – w każdym splocie jest siedem drutów o tej samej średnicy
	6×19	Konstrukcja sześcioplotowa – w każdym splocie jest dziewiętnaście drutów o tej samej średnicy, które są ułożone w trzech warstwach (1 + 6 + 12)
	6×37	Konstrukcja sześcioplotowa – w każdym splocie jest trzydzieści siedem drutów o tej samej średnicy, ułożonych w czterech warstwach (1 + 6 + 12 + 18)

cd. tab. 3.6

	WS 6×36	Konstrukcja sześcioplotowa WS – w każdym splocie jest trzydzieści sześć drutów ($1 + 7 + (7/7) + 14$)
	F 6×19	Konstrukcja sześcioplotowa – w każdym splocie jest dziewiętnaście drutów oraz dodatkowo sześć drutów wypełniających ($1 + 6 + 6F + 12$)
	S 6×19	Konstrukcja sześcioplotowa – w każdym splocie jest dziewiętnaście drutów, ułożonych w dwóch warstwach o odmiennych średnicach drutów ($1 + 9 + 9$)

3.10.6. Przygotowanie raportu z badań

W raporcie z badań należy podać:

- 1) numer normy [40] oraz numery innych stosowanych norm;
- 2) liczbę badanych lin stalowych oraz ich nominalne długości;
- 3) normę, według której wykonano linię stalową;
- 4) oznaczenie liny według normy [40];
- 5) zmierzone wymiary liny (dla liny okrągłej – średnicę w [mm], dla liny płaskiej – szerokość i grubość w [mm]);
- 6) wynik badania (zmierzoną siłę zrywającą linię F_m , sumaryczną siłę zrywającą linię $F_{e,min}$, zmierzoną obliczoną (po skręceniu) siłę zrywającą $F_{m,c}$).

3.11. Próby technologiczne – część 1

3.11.1. Cel próby

Celem próby jest zapoznanie się z metodą realizacji:

- a) próby jednokierunkowego skręcania drutu metalowego, według PN-ISO 7800:1996 [74];
- b) próby przeginania dwukierunkowego drutu metalowego o średnicy lub grubości od 0,3 mm do 10,0 mm, według PN-ISO 7801:1996 [75];
- c) próby przeginania dwukierunkowego blach i taśm metalowych o grubości do 3 mm, według PN-EN ISO 7799:2002 [73];
- d) próby spęczniania metali, według PN-H 04411:1983 [72];

- e) próby podwójnego zginania i próby zawijania ze zginaniem blach cienkich metalowych, według PN-H 04405:1962 [71].

3.11.2. Wprowadzenie

Pod działaniem sił zewnętrznych w metalach zmieniają się odległości między atomami, co prowadzi do ich odkształcenia [5, 27]. Jeżeli po odciążeniu atomy powracają do swoich pierwotnych położenia, to ma miejsce odkształcenie sprężyste. W przypadku, gdy następuje trwałe przemieszczenie atomów (zajmują one inne położenia równowagi, to znaczy po odciążeniu nie wracają do swoich położenia pierwotnych), zachodzi odkształcenie plastyczne. Odkształcenie plastyczne w metalach może być skutkiem:

- a) poślizgu (przemieszczenie się dyslokacji całkowitych wzdłuż płaszczyzn i kierunków krystalograficznych, które są najgęściej obsadzone atomami);
- b) bliźniakowania (obrót jednej części kryształu względem drugiej powoduje powstanie dwóch części kryształu, symetrycznych względem płaszczyzny bliźniakowania).

Ziarna poddane odkształceniu plastycznemu ulegają wydłużeniu w kierunku płynięcia materiału. Z tego powodu zmieniają się własności mechaniczne materiału w kierunku podłużnym i poprzecznym do kierunku płynięcia materiału.

Celem prób technologicznych jest wyznaczenie własności technologicznych (plastycznych) badanych próbek, poddanych działaniu obciążeń zewnętrznych bez oszacowania wartości tych obciążeń. W ogólnym przypadku wynikiem próby technologicznej jest określenie odporności materiału na odkształcenia plastyczne i ujawnienie wad materiałowych (np. pęknięcia lub naderwania). Uzyskany wynik stanowi podstawę do stwierdzenia, czy badany materiał jest przydatny do następnej obróbki plastycznej.

Podczas próby technologicznej materiał badany ulega odkształceniu plastycznemu i przechodzi w stan zgniotu, a następnie w stan umocnienia.

Zgniot jest stanem materiału, który powstaje wskutek odkształcenia plastycznego na zimno (poniżej temperatury rekrytalizacji). W stanie tym dochodzi do podwyższenia własności wytrzymałościowych materiału i obniżenia jego własności plastycznych. Zgniot jako zjawisko trwałe występuje tylko podczas przeróbki plastycznej na zimno (podczas przeróbki plastycznej na gorąco zjawisko to szybko zanika i dlatego nie jest rozpatrywane).

Naprężenie uplastyczniające jest naprężeniem powodującym przejście materiału w stan plastyczny.

Umocnienie jest to stan materiału plastycznie odkształconego na zimno, w którym naprężenie uplastyczniające ulega podwyższeniu. Stanowi skutek zwiększania liczby defektów w sieci krystalograficznej, spowodowanych odkształceniem plastycznym. W stanie tym do zwiększenia odkształcenia należy przyłożyć większe obciążenie zewnętrzne.

W celu wyznaczenia odkształcenia próbki podczas różnych etapów obróbki plastycznej należy oszacować rzeczywiste odkształcenie względne:

$$\varepsilon_{rz} = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{l} = \ln \frac{(l_0 + \Delta l)}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.103)$$

gdzie: l – długość bieżąca próbki,

l_0 – długość początkowa próbki,

l_k – długość końcowa próbki,

Δl – przyrost długości próbki równy $\Delta l = (l_k - l_0)$,

ε – odkształcenie względne równe $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$.

W przypadku, gdy próbka ulega kilkietapowemu wydłużeniu, odkształcenie całkowite próbki ε_c nie może być oszacowane jako suma odkształceń względnych uzyskanych w poszczególnych etapach. Na przykład, dla trzech etapów wydłużenia od l_0 do l_3 ($\varepsilon_1 = \frac{(l_1 - l_0)}{l_0}$, $\varepsilon_2 = \frac{(l_2 - l_1)}{l_1}$, $\varepsilon_3 = \frac{(l_3 - l_2)}{l_2}$) odkształcenie całkowite próbki $\varepsilon_c = \frac{(l_3 - l_0)}{l_0}$ nie jest równe sumie $\varepsilon_c = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$. Z tego względu należy oszacować całkowite odkształcenie rzeczywiste:

$$\varepsilon_{c,rz} = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} + \int_{l_1}^{l_2} \frac{dl}{l} + \int_{l_2}^{l_3} \frac{dl}{l} = \ln(1 + \varepsilon_c) \quad (3.104)$$

Stan odkształcenia próbki badanej jest opisany za pomocą wskaźników odkształcenia plastycznego, do których należą:

- gniot bezwzględny, obliczany jako $\Delta h = h_0 - h_1$, gdzie: h_0 – wysokość początkowa, h_1 – wysokość po badaniu;
- poszerzenie bezwzględne, obliczane jako $\Delta b = b_0 - b_1$, gdzie: b_0 – szerokość początkowa, b_1 – szerokość po badaniu;
- wydłużenie bezwzględne, obliczane jako $\Delta l = l_0 - l_1$, gdzie: l_0 – długość początkowa, l_1 – długość po badaniu;
- gniot względny, obliczany jako $\varepsilon_h = \frac{(h_0 - h_1)}{h_0}$;
- poszerzenie względne, obliczane jako $\varepsilon_b = \frac{(b_0 - b_1)}{b_0}$;
- wydłużenie względne, obliczane jako $\varepsilon_l = \frac{(l_0 - l_1)}{l_0}$;
- współczynnik gniotu, obliczany jako $\lambda_h = \frac{h_1}{h_0}$;
- współczynnik poszerzenia, obliczany jako $\lambda_b = \frac{b_1}{b_0}$;
- współczynnik wydłużenia, obliczany jako $\lambda_l = \frac{l_1}{l_0}$;
- rzeczywisty współczynnik gniotu, obliczany jako $\varphi_h = \ln \frac{h_1}{h_0}$;
- rzeczywisty współczynnik poszerzenia, obliczany jako $\varphi_b = \ln \frac{b_1}{b_0}$;
- rzeczywisty współczynnik wydłużenia, obliczany jako $\varphi_l = \ln \frac{l_1}{l_0}$.

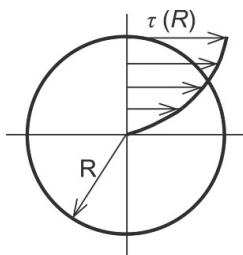
Zgodnie z zasadą stałej objętości muszą być spełnione następujące zależności:

$$\lambda_h \cdot \lambda_b \cdot \lambda_l = 1 \quad (3.105)$$

$$\varphi_h + \varphi_b + \varphi_l = 0 \quad (3.106)$$

Podczas próby skręcania należy pamiętać, że w przekroju okrągłej próbki powstaje nieliniowy rozkład naprężeń stycznych τ , który jest trudny do jednoznacznego określenia (rys. 3.64). Powodami tego zjawiska są:

- 1) nierównomierny rozkład odkształcenia i prędkości odkształcenia na przekroju i długości próbki;
- 2) proces uplastycznienia przekroju, który zachodzi nierównomiernie i nieliniowo od warstw zewnętrznych do rdzenia materiału próbki.

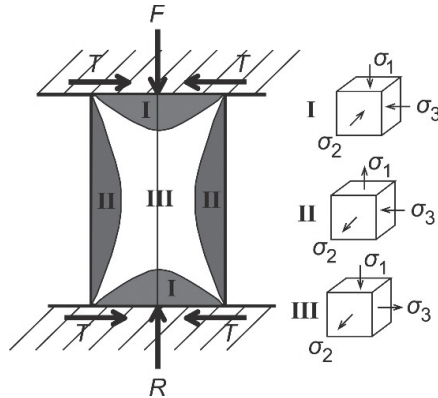


Rys. 3.64. Rozkład naprężeń stycznych τ w przekroju próbki okrągłej o promieniu R

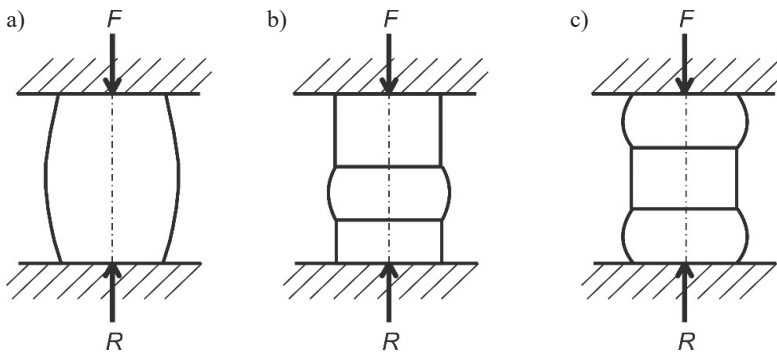
Podczas próby spęczania, wskutek działania osiowej siły ściskającej F , zachodzi zjawisko tarcia powierzchni czołowych próbki o powierzchnie uchwytu (rys. 3.65). Siły tarcia T hamują odkształcenie (poszerzenie) materiału przylegającego do powierzchni uchwytu i powodują powstanie nierównomiernego stanu naprężeń i odkształceń, który zaburza jednoosiowe ściskanie próbki badanej, przy czym $F = R$. Z tego względu praktyczna realizacja ściskania jednoosiowego jest niemożliwa. Nierównomierny stan naprężeń i odkształceń można podzielić na trzy strefy:

- I. strefa ograniczonej odkształcalności;
- II. strefa zewnętrzna (na powierzchniach bocznych występują obwodowe naprężenia rozciągające, przyspieszające proces pęknięcia materiału próbki);
- III. strefa największej odkształcalności.

Nierównomierny stan naprężeń i odkształceń, który dodatkowo może być zaburzony przez niejednorodność materiału próbki, powoduje przyjęcie przez próbkę walcowego albo prowadzi do jej wybożenia. W przypadku, gdy próbka przyjmuje kształt beczkowaty na całej swojej długości, mamy do czynienia ze spęczaniem równomiernym (rys. 3.66a). W przypadku, gdy występuje miejscowa niejednorodność materiału, dochodzi do spęczania miejscowego (rys. 3.66b). W przypadku badania długich i miejscowo niejednorodnych próbek może dojść do spęczania nierównomiernego (rys. 3.66c).



Rys. 3.65. Strefy odkształceń i naprężeń w poszczególnych częściach próbki:
I – strefa ograniczonej odkształcalności; II – strefa zewnętrzna; III – strefa największej odkształcalności

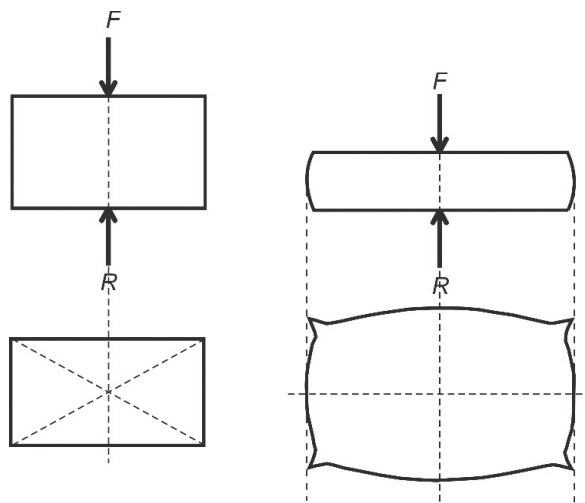


Rys. 3.66. Postacie próbki metalowej po spęczaniu:

- a) spęczanie równomierne (pojedyncza sferyczność materiału); b) spęczanie miejscowe;
c) spęczanie nierównomierne (podwójna sferyczność materiału)

W przypadku spęczania próbki w kształcie prostopadłościanu (rys. 3.67) oprócz wybrzuszenia próbki zachodzi także wychylenie ścian bocznych, które dążą do uzyskania przez przekrój poprzeczny próbki zarysu kołowego. Zgodnie z prawem najmniejszego oporu zarys kołowy będzie miał najmniejszy obwód dla danego pola przekroju próbki. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku spęczania próbki w kształcie prostopadłościanu, w której stosunek wysokości do najmniejszego boku jest większy niż 3,5, dochodzi także do wybożenia próbki.

Podczas spęczania za pomocą młotów wzrost prędkości odkształcania przyczynia się do wzrostu naprężeń uplastyczniających, wzrostu temperatury odkształcanego materiału oraz niejednakowego wypełnienia górnej i dolnej matrycy.



Rys. 3.67. Spęszanie próbki w kształcie prostopadłościanu

3.11.3. Próba jednokierunkowego skręcania drutu

Celem próby skręcania jednokierunkowego jest określenie odporności na odkształcenia plastyczne drutu metalowego o średnicy/grubości od 0,3 mm do 10,0 mm oraz różnego rodzaju materiału badanego drutu metalowego. Podczas badania drut należy skręcać w jednym kierunku wokół jego osi podłużnej w temperaturze pokojowej.

Do badania należy wykorzystać wyprostowaną próbkę drutu metalowego. Prostowanie próbki powinno być wykonane ręcznie za pomocą młotka i podkładki wykonanej z tego samego materiału co młotek. Ponadto podczas prostowania:

- 1) podkładka powinna być umieszczona na powierzchni drewnianej, miedzianej lub wykonanej z tworzywa sztucznego;
- 2) należy unikać uszkodzenia powierzchni próbki i jej skręcenia.

W przypadku, gdy drut posiada widoczne zadziory, nie należy go prostować.

Długość próbki badanej należy dobrać tak, aby zapewnić wymaganą odległość pomiędzy uchwytami skręcarki.

Konstrukcja skręcarki powinna zapewniać:

- a) swobodną zmianę odległości pomiędzy uchwytami podczas skręcania próbki badanej;
- b) rozciąganie próbki badanej podczas jej skręcania;
- c) skręcanie próbek różnej długości.

Uchwyty skręcarki należy wykonać z materiału o dużej sztywności i odporności na ścieranie. Uchwyty należy zamocować w taki sposób, aby podczas próby skręcania zapewniały one skręcanie próbki wokół jej osi długiej i nie wywoływały dodatkowego momentu gnącego w próbce. Jeden uchwyt powinien umożliwiać obracanie się wokół osi długiej próbki, drugi

uchwyt powinien zaś pozostać nieruchomy lub umożliwiać obrót niezbędny do pomiaru momentu skręcającego.

Przed badaniem próbkę należy zamocować w uchwytach w taki sposób, aby jej oś podłużna pozostała prosta podczas skręcania. Można to zapewnić za pomocą obciążenia rozciągającego nieprzekraczającego 2% wartości obciążenia zrywającego drut. Po zamocowaniu próbki w skręcarce należy ją obracać jednym uchwytem ze stałą prędkością, aż do osiągnięcia wymaganej liczby skręceń lub do zniszczenia próbki, odczytując liczbę skręceń.

W przypadku, gdy próbka przeniosła liczbę skręceń wyznaczoną przez normę przedmiotową badanego drutu, wynik badania należy uznać za zgodny z wymaganiami normy [74], nie biorąc pod uwagę miejsca pęknięcia.

W przypadku, gdy próbka przeniosła mniejszą liczbę skręceń niż podano w normie przedmiotowej badanego drutu, a ponadto pęknięcie nastąpiło w miejscu znajdującym się w odległości:

- mniejszej od 2-krotnej średnicy próbki od uchwytu – próbę należy unieważnić i powtórzyć;
- równej lub większej od 2-krotnej średnicy od uchwytu – wynik badania należy uznać za zgodny z wymaganiami normy [74].

Po przeprowadzeniu próby skręcania jednokierunkowego należy określić typ przelomu próbki:

- 1) ciągliwy – płaszczyzna zniszczenia jest gładka, bez rozwarstwień i jest prostopadła do osi próbki;
- 2) kruchy – płaszczyzna zniszczenia jest pochylona pod małym kątem do osi próbki;
- 3) anizotropowy – płaszczyzna zniszczenia posiada liczne rozwarstwienia, które są skutkiem zanieczyszczenia materiału próbki.

3.11.4. Próba przeginania dwukierunkowego drutu metalowego oraz blach i taśm o grubości do 3 mm

Celem próby przeginania dwukierunkowego jest określenie odporności na odkształcenia plastyczne drutu metalowego, blachy lub taśmy o wymiarach (średnicy/grubości) od 0,3 mm do 10,0 mm oraz określenie rodzaju ujawnionych lokalnych wad materiałowych. Próba polega na wielokrotnym przeginaniu w przeciwnych kierunkach jednego końca próbki metalowej o kąt 90° wokół wałka (cylindrycznej podpory) o określonym promieniu w temperaturze pokojowej.

Do badania drutu metalowego należy wykorzystać próbkę, która w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny zginania jest wyprostowana, a w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny zginania może posiadać małe zgięcie. W przypadku konieczności prostowania próbki należy ją wyprostować ręcznie za pomocą młotka i podkładki wykonanej z tego samego materiału co młotek. Podkładkę należy umieścić na powierzchni drewnianej, miedzianej lub wykonanej z tworzywa sztucznego. Podczas prostowania należy unikać uszkodzenia powierzch-

ni próbki i jej skręcenia. W przypadku, gdy drut posiada umiejscowione ostre zagięcia, nie należy go prostować.

Do badania blachy lub taśmy należy wykorzystać próbkę pobraną z blachy/taśmy, która ma nieuszkodzone powierzchnie, a jej grubość jest równa grubości blachy/taśmy badanej. Szerokość próbki obrobionej mechanicznie powinna wynosić od 20 do 25 mm. Dopuszczalne jest także badanie taśm o mniejszej szerokości.

W przypadku konieczności zastosowania metod obróbki mechanicznej do przygotowania próbek należy je przygotować takimi metodami, które spowodują minimalne umocnienie i nagrzanie materiału próbki. Należy przy tym zagwarantować, aby powierzchnia próbki była wolna od pęknięć i wgnieceń, a krawędzie nie zawierały zadziorów.

Do próby przegینania drutu lub blach/taśm należy wykorzystać urządzenie do przegینania, które powinno posiadać (rys. 3.68): prowadnicę, dwa wałki zginające (podpory cylindryczne), zaciski (uchwyty do zaciskania próbki) oraz dźwignię (uchwyt roboczy). Powierzchnie czołowe zacisków, dźwigni i wałków zginających powinny się cechować dużą sztywnością i odpornością na ścieranie. Osie wałków zginających powinny być wzajemnie równoległe z dokładnością do 0,1 mm i prostopadłe do płaszczyzny zginania. Promień wałka zginającego, odległość pomiędzy górną płaszczyzną styczną do wałków zginających a dolną powierzchnią prowadnicy oraz średnica otworu prowadnicy powinny być zależne od średnicy (grubości) drutu badanego lub grubości blachy/taśmy.



Rys. 3.68. Przyrząd do przegینania drutu

Przed badaniem próbkę należy umieścić w dźwigni, która znajduje się w pozycji pionowej. Dolny koniec próbki należy zamocować pomiędzy zaciskami w taki sposób, aby była ona prostopadła do osi wałków zginających. W przypadku badania prętów o przekroju niekołowym należy zagwarantować, aby większy wymiar przekroju próbki był równoległy do powierzchni czołowych uchwytów.

Podczas badania próbkę należy na przemian przeginać o kąt 90° w kierunkach przeciwnych bez przyspieszeń (utrzymując stałą prędkość przeginania). Za jedno przegięcie należy przyjąć przegięcie o kąt 90° od pozycji wejściowej (pionowej) oraz powrót do tej pozycji. Kolejne przegięcie należy wykonać w przeciwnym kierunku. Prędkość przeginania nie powinna być większa niż jedno przegięcie na sekundę. W przypadku nagrzania materiału próbki należy zmniejszyć prędkość przeginania.

Dopuszczalne jest wstępne obciążenie próbki, które zapewnia stały styk pomiędzy próbką a wałkami zginającymi. Jeżeli w normie przedmiotowej nie podano inaczej, to wartość wstępnego obciążenia powinna być równa lub mniejsza od 2% wartości obciążenia zrywającego badany drut lub blachę/taśmę.

Próbę przeginania należy kontynuować do:

- 1) uzyskania liczby przegięć podanej w normie przedmiotowej badanego drutu lub badanej blachy/taśmy;
- 2) wystąpienia pęknięcia próbki drutu metalowego lub badanej blachy/taśmy, widocznego nieuzbrojonym okiem (jeżeli jest to podane w normie przedmiotowej badanego drutu, blachy lub taśmy);
- 3) wystąpienia przełomu próbki badanej.

Do liczby przegięć nie powinno się zaliczać przegięcia, podczas którego doszło do pęknięcia lub przełomu próbki.

3.11.5. Próba spęczania metali

Celem próby spęczania metali jest określenie zdolności metalu do odkształceń plastycznych z jednoczesnym wykryciem wad materiałowych powstałych podczas próby spęczania. Próbę spęczania można przeprowadzić na zimno lub na gorąco. Wybór warunków spęczania należy uzależnić od warunków następnej przeróbki plastycznej, której zostanie poddany badany materiał.

Próbę spęczania należy stosować do badań wyrobów i półwyrobów kutych, walcowanych, ciągnionych, łuszczonych, szlifowanych i wyciskanych. Próba spęczania pozwala na:

- 1) uzyskanie odkuwki o większym przekroju poprzecznym w porównaniu z początkowym przekrojem poprzecznym;
- 2) ograniczenie anizotropii właściwości mechanicznych materiału w kierunku wzdłużnym i poprzecznym na skutek zgrzania pęcherzy, rzadzizn i nieciągłości materiałowych.

Do badania należy przygotować próbki o przekroju okrągłym, kwadratowym albo sześciokątnym. Próbki należy przygotować takimi metodami obróbki mechanicznej, które spo-

wodują minimalny zgniot powierzchniowy i nagrzanie materiału próbki. W przypadku, gdy powierzchnia boczna badanego wyrobu lub półwyrobu została obrobiona mechanicznie (szlifowana, obtoczona, łuszczona, skórowana), dopuszczalne jest jej dodatkowe przeszlifowanie lub przetoczenie w dolnej tolerancji wymiarowej, zgodnej z normą przedmiotową. Ślady obróbki skrawaniem każdej powierzchni próbki (czołowej i bocznej) powinny być prostopadłe do osi próbki. Przy wycinaniu próbek za pomocą palnika lub nożyc należy przewidzieć naddatek na obróbkę mechaniczną powierzchni czołowych. Naddatek ten powinien wynosić co najmniej 30 mm.

W przypadku, gdy celem próby spęczenia jest określenie zdolności materiału do odkształceń plastycznych, dopuszczalne jest obtaczanie próbek do średnicy: 30 mm (dla wyrobu, którego wymiar charakterystyczny jest powyżej 30 mm) i 150 mm (dla wyrobu, którego wymiar charakterystyczny jest powyżej 150 mm).

Znormalizowana próbka do badania powinna mieć wysokość równą 1,5-krotnemu wymiarowi charakterystycznemu przekroju poprzecznego próbki.

Próbie spęczenia należy przeprowadzić na urządzeniu do spęczenia: maszynie wytrzymałościowej (spęczenie statyczne) lub młocie mechanicznym (spęczenie dynamiczne). Płyty dociskowe urządzenia do spęczenia powinny być płaskie i należy je usytuować równolegle względem siebie oraz prostopadłe względem osi próbki badanej. W celu zapewnienia wspólnego obciążenia próbki i unikania jej wybożenia (skoszenia) zalecane jest zainstalowanie przegubu kulistego w jednej z płyt dociskowych. Konstrukcja tego przegubu nie powinna wpływać na wynik próby. W przypadku zastosowania młota mechanicznego wymiar charakterystyczny próbki nie powinien przekraczać 10 mm.

W przypadku spęczenia na gorąco należy wykorzystać takie urządzenie grzewcze, które zapewni równomierne nagrzewanie próbki do zadanej temperatury.

Próbki z metali i stopów z metali nieżelaznych o wymiarze charakterystycznym z zakresu od 0,9 do 30 mm należy poddać próbie spęczenia na zimno. Również próbki ze stali o wymiarze charakterystycznym z zakresu od 3 do 30 mm należy poddać próbie spęczenia na zimno. Próbki ze stali o wymiarze charakterystycznym z zakresu od 5 do 150 mm należy poddać próbie spęczenia na gorąco.

Po ustawieniu próbki w uchwytach urządzenia do spęczenia próbkę należy spęczać wzdłuż jej osi do chwili uzyskania zadanego względnego odkształcenia plastycznego. Dla próbki ze stali spęczanej na zimno względne odkształcenie plastyczne powinno wynosić 50%. Dla próbki z metalu lub stopu z metali nieżelaznych spęczanej na zimno względne odkształcenie plastyczne powinno wynosić 66%. Dla próbki ze stali spęczanej na gorąco względne odkształcenie plastyczne również powinno wynosić 66%.

Po próbie spęczenia należy przeprowadzić badanie wizualne i opisać rodzaj oraz głębokość wad materiałowych występujących na powierzchni próbki. Uzyskany wynik jest dowodający jedynie w przypadku, gdy próbka nie ulega wybożeniu oraz ma powierzchnie wolne od pęknięć, naderwań i rozwarstwień. W celu dokładnego określenia rodzaju i głę-

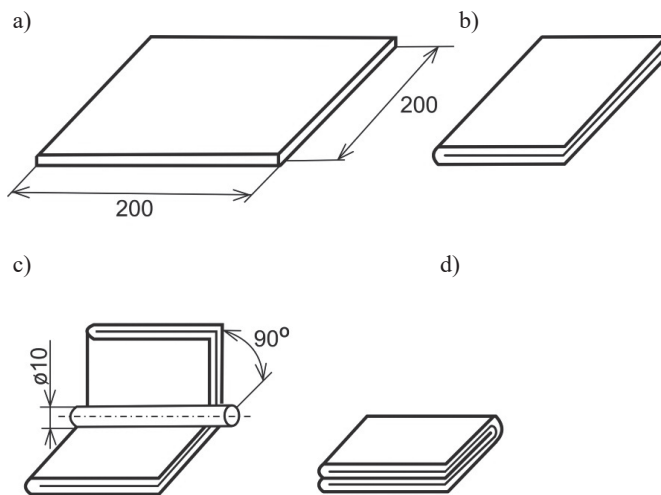
bokości wad materiałowych dopuszczalne jest przeszlifowanie próbki tarczą szlifierską lub spiłowanie palnikiem miejsc wadliwych.

3.11.6. Próba podwójnego zginania i próba zawijania ze zginaniem cienkich blach metalowych

Celem próby podwójnego zginania i próby zawijania ze zginaniem blach metalowych jest określenie zdolności blachy do odkształceń plastycznych. Ponadto, w przypadku blach metalowych pokrytych warstwą ochronną celem jest także określenie przylegania tej warstwy.

Do badania należy wykorzystać blachy metalowe o grubości nie większej niż 0,8 mm. Do próby podwójnego zginania należy przygotować próbkę o wymiarach nie mniejszych niż 200×200 mm. Do próby zawijania ze zginaniem należy przygotować dwie próbki o wymiarach nie mniejszych niż 150×150 mm. Badania należy przeprowadzić w temperaturach nie niższych niż 10°C .

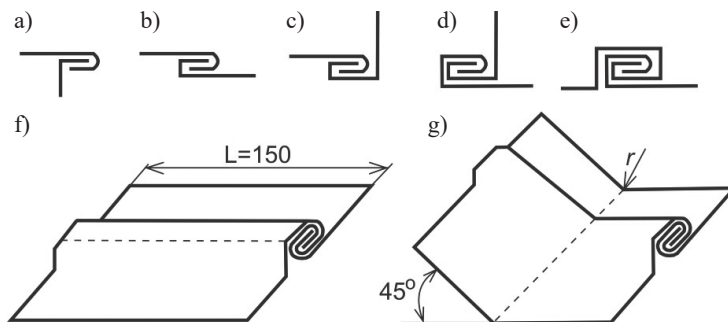
Próbkę podwójnego zginania należy przeprowadzać w trzech etapach. Pierwszy etap polega na zginaniu blachy o kąt 180° do styku ramion (rys. 3.69b). Drugi etap polega na zginaniu blachy o kąt 90° dookoła osi prostopadłej do pierwszego gięcia na trzpieniu o średnicy 10 mm (rys. 3.69c). Trzeci etap polega na wyjęciu trzpienia i zginaniu próbki do styku ramion (rys. 3.69d).



Rys. 3.69. Etapy próby podwójnego zginania blachy

Próbkę zawijania ze zginaniem również należy przeprowadzić w trzech etapach. Pierwszy etap polega na ścisłym złączeniu dwóch odcinków blachy poprzez ich podwójne zawinięcie (rys. 3.70). Drugi etap polega na zginaniu złączonych odcinków wzdłuż osi prostopadłej do osi zawinięcia na trzpieniu o promieniu r równym $3 \div 5$ grubości blachy o kąt określony w normach przedmiotowych badanej blachy (rys. 3.70g). Kąt ten nie powinien być większy niż 45° . Po zginaniu należy dokonać wyprostowania złączonych blach. Trzeci etap polega na

powtarzającym się zginaniu i prostowaniu. Liczba tych operacji powinna być zgodna z liczbą podaną w normie przedmiotowej. Przy tym niedopuszczalne jest zginanie w kierunku przeciwnym do kierunku pierwotnego zginania.



Rys. 3.70. Etapy próby zawijania ze zginaniem blachy

Po wykonaniu próby należy przeprowadzić badanie wizualne. W przypadku braku pęknięć na powierzchniach próbki wynik badania uznaje się za pozytywny.

3.11.7. Przygotowanie raportu z badań

Próba jednokierunkowego skręcania drutu

W raporcie z badań należy podać:

- 1) numer normy [74] i numer normy przedmiotowej (jeżeli jest stosowana);
- 2) identyfikację próbek (oznaczenie, rodzaj materiału, numer wytopu);
- 3) wymiary charakterystyczne przekroju poprzecznego badanego drutu;
- 4) metody prostowania (jeżeli zostały wykorzystane);
- 5) warunki przeprowadzenia próby;
- 6) wynik badania.

Próba przeginięcia dwukierunkowego drutu metalowego oraz blach i taśm o grubości do 3 mm

W raporcie z badań **drutu metalowego** należy podać:

- 1) numer normy [75] oraz numer normy przedmiotowej badanego drutu;
- 2) identyfikację próbek (oznaczenie, rodzaj materiału, numer wytopu);
- 3) wymiary charakterystyczne przekroju poprzecznego badanego drutu;
- 4) metody prostowania (jeżeli zostały wykorzystane);
- 5) warunki przeprowadzenia próby (promień wałka zginającego, odległość płaszczyzny stycznej do wałków zginających od dolnej powierzchni prowadnicy, obciążenie wstępne);
- 6) kryteria zakończenia próby;
- 7) wynik badania.

W raporcie z badań **blach i taśm** należy podać:

- 1) numer normy [73] oraz numer normy przedmiotowej blachy lub taśmy badanej;
- 2) identyfikację próbek (oznaczenie, rodzaj materiału, kierunek pobierania próbek);
- 3) wymiary charakterystyczne próbek badanych;
- 4) warunki przeprowadzenia próby (promień wałka zginającego, odległość płaszczyzny stycznej do wałków zginających od dolnej powierzchni prowadnicy, obciążenie wstępne);
- 5) kryteria zakończenia próby;
- 6) wynik badania.

Próba spęczania metali

W raporcie z badań należy podać:

- 1) numer normy [72] oraz numer normy przedmiotowej;
- 2) identyfikację próbek do badań (materiał, numer wytopu, oznaczenie);
- 3) wymiary próbek określone przed badaniem i po badaniu;
- 4) temperaturę próby spęczania;
- 5) sposób przeprowadzenia próby spęczania;
- 6) wyniki badania.

Próba podwójnego zginania i próba zawijania ze zginaniem cienkich blach metalowych

W raporcie z badań należy podać:

- 1) numer normy [71] i numer normy przedmiotowej;
- 2) identyfikację badanych próbek (materiał blachy);
- 3) rodzaj badania;
- 4) wynik próby.

3.12. Próby technologiczne – część 2

3.12.1. Cel próby

Celem próby jest zapoznanie się z:

- a) metodą przeprowadzenia próby rozciągania pierścienia wyciętego z rury metalowej o przekroju okrągłym, zgodnie z PN-EN ISO 8496:2014-02 [67];
- b) metodą przeprowadzenia próby rozłaczania rury metalowej o przekroju okrągłym, zgodnie z PN-EN ISO 8493:2005 [64];
- c) metodą przeprowadzenia próby rozłaczania pierścienia wyciętego z rury metalowej, zgodnie z PN-EN ISO 8495:2014-02 [66];
- d) metodą przeprowadzenia próby spłaszczania rury metalowej, zgodnie z PN-EN ISO 8492:2014-02 [63];

- e) przebiegiem procesu gięcia plastycznego i metodą przeprowadzenia próby zginania rury metalowej, zgodnie z PN-EN ISO 8491:2005 [62];
- f) metodą przeprowadzenia prób tłoczności wyrobów metalowych.

W praktyce wykonuje się także próbę wywijania kołnierza – PN-EN ISO 8494:2014-02 [65]. Wymaga ona jednak specjalistycznego oprzyrządowania do wytłaczania.

3.12.2. Próba rozciągania pierścienia wyciętego z rury metalowej

Cele próby rozciągania pierścienia wyciętego z rury obejmują:

- 1) określenie wad materiałowych powstałych w procesie rozciągania na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni pierścienia (łuski, zawalcowania, pęknięcia, naderwania, pęcherze, rozwarstwienia);
- 2) określenie podatności rury na odkształcenia plastyczne.

Do badania można wykorzystać rury, których:

- 1) średnica zewnętrzna jest większa niż 150 mm;
- 2) grubość ścianki jest nie większa niż 40 mm;
- 3) średnica wewnętrzna jest większa niż 100 mm.

W celu wykonania badania należy wyciąć pierścień z rury w taki sposób, aby powierzchnie czołowe pierścienia były prostopadłe do jego powierzchni bocznej. Długość próbki do badań powinna wynosić 15 mm. W przypadku, gdy grubość ścianki rury jest większa niż 15 mm, należy wyciąć pierścień o długości równej grubości ścianki rury badanej. Należy zagwarantować, aby krawędzie próbki były wolne od zadziorów i pęknięć.

Oprzyrządowanie do próby rozciągania składa się z dwóch okrągłych sworzni, zamocowanych równolegle względem siebie. Sworznie powinny się cechować możliwością przesunięcia względem siebie. Zalecane jest, aby minimalna średnica sworzni była równa 3-krotnej grubości ścianki rury badanej.

W celu przeprowadzenia badania pierścienia wycięty z rury należy umieścić na sworzniach i poddać rozciąganiu po obwodzie do całkowitego rozerwania. Podczas próby sworznie powinny się rozsuwać ze stałą prędkością, która nie powinna przekraczać 5 mm/s. Po rozerwaniu pierścienia należy przeprowadzić badanie wizualne nieuzbrojonym okiem. Wynik próby rozciągania pierścienia wyciętego z rury należy uznać za pozytywny, jeżeli podczas badań wizualnych nie ujawniono pęknięć na powierzchni złamanego pierścienia.

3.12.3. Próba rozłaczania rury metalowej

Celem próby rozłaczania rury metalowej o przekroju okrągłym jest określenie podatności rury na odkształcenia plastyczne podczas jej rozłaczania za pomocą trzpienia (narzędzia kształtującego w kształcie stożka).

Do badania można wykorzystać rury, których:

- 1) średnica zewnętrzna jest nie większa niż 150 mm (w przypadku rury z metalu lekkiego średnica zewnętrzna nie może być większa niż 100 mm);
- 2) grubość ścianki nie przewyższa 10 mm.

Do badań należy pobrać próbkę o długości równej:

- 1) 2-krotnej początkowej średnicy zewnętrznej rury, w przypadku gdy kąt rozwarcia β trzpienia jest mniejszy lub równy 30° ;
- 2) 1,5-krotnej początkowej średnicy zewnętrznej rury, w przypadku gdy kąt rozwarcia β trzpienia jest większy niż 30° .

Pobranie krótszej próbki do badań jest dopuszczalne jedynie w sytuacji, gdy długość cylindrycznej części próbki po roztlóczeniu będzie nie mniejsza niż połowa początkowej średnicy zewnętrznej rury.

Należy zagwarantować, aby powierzchnie czołowe próbki były prostopadłe do powierzchni bocznej. Krawędzie czołowej powierzchni roztlączanej powinny zostać zaokrąglone za pomocą pilnika lub fazowania. W przypadku pobierania próbek z rury spawanej wypukłość szwu ze strony wewnętrznej rury może zostać usunięta sposobem mechanicznym, który nie zmienia właściwości mechanicznych materiału próbki.

Do roztlączania należy wykorzystać uniwersalną maszynę wytrzymałościową. W jednym z uchwytów maszyny wytrzymałościowej należy zainstalować trzpień, który powinien mieć kształt stożka o kącie rozwarcia β , którego wartość jest zgodna z odpowiednią normą przedmiotową. Zalecane jest przyjęcie kąta rozwarcia β równego 30° , 45° albo 60° . Trzpień powinien być wykonany z materiału odpornego na ścieranie i o dużej sztywności. Powierzchnia trzpienia powinna być wypolerowana i bez zadrapań.

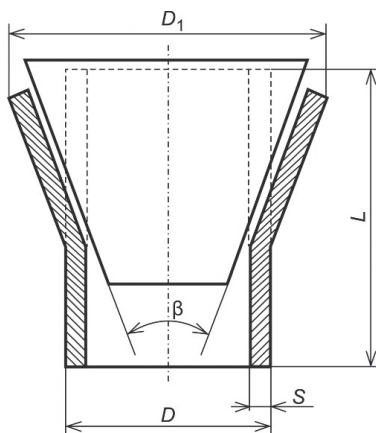
W przypadku roztlączania rur wzdłużnie spawanych dopuszczalne jest wykonanie rowka na trzpieniu, dopasowanego do wypukłości szwu po wewnętrznej stronie rury.

W celu przeprowadzenia badania próbkę wyciętą z rury należy poddać roztlączeniu za pomocą trzpienia (rys. 3.71). Przed roztlączeniem wskazane jest nasmarowanie trzpienia, po to by zmniejszyć siły tarcia powstające podczas ślizgania się powierzchni trzpienia po powierzchni próbki. Proces roztlączania powinien trwać do chwili uzyskania średnicy zewnętrznej o wartości podanej w odpowiedniej normie przedmiotowej (rys. 3.71, według normy [64]).

Podczas roztlączania należy zagwarantować:

- 1) płynne wcisnięcie trzpienia w badaną próbkę, bez uderzeń i skoków;
- 2) pokrywanie się osi trzpienia z osią próbki;
- 3) nieobracanie się trzpienia względem próbki;
- 4) prędkość roztlączania nieprzekraczającą 50 mm/min.

Po próbie należy przeprowadzić badanie wizualne. Jeżeli nie zauważono pęknięć na powierzchniach próbki, to wynik badania uznaje się za pozytywny. Małe spękania dostrzeżone na krawędziach próbki nie powinny być traktowane jako wynik niezadowalający.



Rys. 3.71. Schemat próby rozciągania rury: D – średnica rury przed badaniem, D_1 – średnica rury po badaniu, L – wysokość próbki, S – grubość rury, β – kąt rozwarcia trzpienia

3.12.4. Próba rozciągania pierścienia wyciętego z rury metalowej

Cele próby rozciągania pierścienia wyciętego z rury to ujawnienie wad na powierzchniach rury i w jej ściance oraz określenie podatności pierścienia na odkształcenia plastyczne.

Do badania można zastosować rury, których:

- 1) średnica zewnętrzna jest nie mniejsza niż 18 mm i nie większa niż 150 mm;
- 2) grubość ścianki jest nie mniejsza niż 2 mm i nie większa niż 16 mm.

Do badania należy przygotować próbkę o długości od 10 mm do 16 mm. Powierzchnie czołowe pierścienia powinny być prostopadłe do jego powierzchni bocznej. Krawędzie powierzchni czołowych należy zaokrąglić za pomocą szlifowania lub fazowania. W przypadku badania pierścieni pobranych z rur spawanych w próbkach należy usunąć wypukłość szwu znajdującą się na wewnętrznej stronie rury sposobem mechanicznym, który nie zmienia właściwości mechanicznych materiału próbki.

Do rozciągania należy wykorzystać uniwersalną maszynę wytrzymałościową. W jednym z uchwytów maszyny wytrzymałościowej należy zainstalować trzpień stożkowy, którego długość robocza powinna być zgodna z odpowiednią normą przedmiotową. Jeśli w normie przedmiotowej nie podano wymiarów trzpienia, należy zagwarantować, aby trzpień używany do badania cechował się zbieżnością średnic równą 1:5 (rys. 3.71, norma [66]). Trzpień powinien być wykonany z materiału odpornego na ścieranie i charakteryzującego się dużą sztywnością. Powierzchnia trzpienia powinna być wypolerowana i bez zadrapań.

Próba polega na rozciąganiu pierścienia (pierścieni) wyciętego z rury za pomocą trzpienia stożkowego. Przed rozciąganiem wskazane jest nasmarowanie pierścieni i trzpienia, po to by zminimalizować siły tarcia powstające podczas ślizgania się powierzchni trzpienia po powierzchni próbki (próbek). Proces rozciągania powinien trwać do rozerwania pierścienia (pierścieni) albo do chwili osiągnięcia wartości rozciągania podanej w odpowiedniej normie

przedmiotowej. Dopuszczalne jest badanie pierścieni umieszczonych jeden na drugim. W takim przypadku wymagane jest zapewnienie współosiowego ułożenia wszystkich badanych pierścieni i trzpienia.

Podczas rozłaczania należy zagwarantować:

- 1) płynne wcisnięcie trzpienia w badaną próbkę (badane próbki), bez uderzeń i skoków;
- 2) nieobracanie się trzpienia względem próbki;
- 3) prędkość rozłaczania nieprzekraczającą wartości 30 mm/s.

Po próbie należy przeprowadzić badanie wizualne. Jeżeli nie zauważono pęknięć na powierzchniach próbki, to wynik badania uznaje się za pozytywny. Małe spękania dostrzeżone na krawędziach próbki nie powinny być traktowane jako wynik niezadowalający

3.12.5. Próba spłaszczania rury metalowej

Cele próby obejmują określenie podatności rury metalowej o przekroju okrągłym na odkształcenia plastyczne oraz ujawnienie wad na powierzchni i w ściankach rury podczas jej spłaszczania.

Do badania można wykorzystać rury, których średnica zewnętrzna jest nie większa niż 600 mm, grubość ścianki zaś jest nie większa niż 15% średnicy zewnętrznej.

Długość próbki do badań powinna być nie mniejsza niż 10 mm i nie większa niż 100 mm. Powierzchnie czołowe próbki powinny być prostopadłe do jej powierzchni bocznej. Krawędzie powierzchni czołowych powinny zostać zaokrąglone za pomocą szlifowania lub fazowania.

Do spłaszczania należy zastosować uniwersalną maszynę wytrzymałościową. Oprzyrządowanie do spłaszczania powinno posiadać równoległe płyty dociskowe o odpowiedniej twardości. Płyty te powinny się cechować możliwością zbliżenia się do siebie na odstęp podany w normie przedmiotowej badanej rury. Płyty dociskowe powinny mieć szerokość większą od szerokości próbek badanych. Minimalna szerokość powinna być równa 1,6 średnicy zewnętrznej rury przed spłaszczaniem.

W celu przeprowadzenia badania badaną próbkę należy umieścić na dolnej płycie dociskowej, zapewniając prostopadłość między osią rury a linią działania siły ściskającej. Następnie próbkę należy poddać spłaszczaniu przez dociskanie górnej płyty dociskowej. Prędkość spłaszczania nie powinna przekraczać 25 mm/min. Proces należy kontynuować do chwili uzyskania odstępu pomiędzy płytami dociskowymi podanego w odpowiedniej normie przedmiotowej:

- a) spłaszczanie do określonej wysokości – w przypadku, gdy przed osiągnięciem zadanej wysokości na powierzchni rury ujawni się pęknięcie lub naderwanie, próbkę należy natychmiast przerwać;
- b) spłaszczanie do styku – powierzchnie wewnętrzne próbki powinny zetknąć się ze sobą na odcinku odpowiadającym połowie szerokości wewnętrznej próbki spłaszczonej; w przy-

padku ujawnienia się pęknięcia lub naderwania na powierzchni rury przed zetknięciem jej ścianek próbę należy natychmiast przerwać;

- c) spłaszczanie próbki pobranej z rury spawanej – próbkę należy umieścić względem płyt dociskowych w sposób podany w normie przedmiotowej badanej rury i poddać ją ścisaniu do określonej wysokości lub styku; w przypadku, gdy w normie przedmiotowej nie określono położenia złącza względem płyt dociskowych, należy je umieścić w płaszczyźnie nachylonej o 45° do kierunku spłaszczania; podczas spłaszczania należy uważnie obserwować miejsce spawania w celu stwierdzenia, czy nie ujawnią się w nim pęknięcia lub naderwania.

Po próbie należy przeprowadzić badanie wizualne, nie biorąc pod uwagę odpadnięcia warstwy tlenków. Jeżeli nie zauważono pęknięć lub naderwań na powierzchniach próbki, wynik badania uznaje się za pozytywny.

3.12.6. Gięcie plastyczne

Proces gięcia plastycznego polega na trwałej zmianie promienia krzywizny wyrobu metalowego bez naruszenia spójności materiału wyrobu [11, 26, 27]. Przebiega on w trzech etapach:

- 1) gięcie sprężyste;
- 2) gięcie plastyczne;
- 3) dotłaczanie (nadanie elementowi ostatecznego kształtu poprzez usuwanie nierówności i skutków sprężynowania).

Przebieg procesu gięcia zależy od rodzaju materiału i wad, szczególnie na powierzchni materiału zginanego [21]. Gięcie plastyczne można przeprowadzać do pewnej wartości naprężenia, po której przekroczeniu materiał ulega zniszczeniu (po stronie włókien rozciąganych ujawniają się pęknięcia, po stronie włókien ściskanych zaś – pofałdowania (wskutek utraty stateczności materiału)).

Trzeba pamiętać, że metale bardzo plastyczne, przy tych samych grubościach kształtowanych elementów, można zginać na znacznie mniejsze promienie niż materiały twarde [5]. Wady powierzchniowe znajdujące się po stronie włókien rozciąganych znacznie przyspieszają pęknięcie materiału. Z tego względu należy zapewnić, aby zadziory znajdowały się zawsze po stronie włókien ściskanych. W celu przeciwdziałania pofałdowaniu (utrata stateczności materiału wskutek działania naprężenia ściskającego) należy zapewnić dodatkowe działanie osiowych naprężeń rozciągających i/lub wprowadzić element dociskowy.

Podczas gięcia pręta wąskiego (szerokość b jest znacznie mniejsza od grubości g) o małej krzywiznie w materiale występuje jednoosiowy stan naprężenia, spowodowany naprężeniami normalnymi. Włókna dolne są rozciągane, a włókna górne – ściskane, przy czym pomija się wpływ naprężeń normalnych działających w przekroju poprzecznym ze względu na ich niewielką wartość.

W przypadku gięcia pręta szerokiego (szerokość b jest porównywalna z grubością g) o małej krzywiznie w materiale występuje dwuosiowy stan naprężenia, który składa się z normalnych naprężeń działających przy zginaniu pręta wąskiego oraz dodatkowych naprężeń normalnych występujących w przekroju poprzecznym pręta.

Po odkształceniu przekrój poprzeczny pręta wąskiego lub szerokiego przyjmuje postać trapezu: szerokość pasma po stronie włókien ściskanych ulega zwiększeniu, szerokość pasma po stronie włókien rozciąganych ulega zaś zmniejszeniu.

Podczas zginania pręta o dużej krzywiznie w materiale pręta występuje trójosiowy stan naprężenia. Stan ten jest spowodowany nałożeniem normalnych naprężeń własnych (powstają podczas początkowego zakrzywienia osi pręta) oraz normalnych naprężeń pochodzących od następnego zewnętrznego zginania.

Warstwa materiału nieulegająca deformacji podczas gięcia plastycznego jest nazywana warstwą obojętną. Jej położenie zależy od rodzaju materiału, grubości elementu i parametrów gięcia (kąta gięcia, promienia gięcia, przykładane obciążenie zewnętrzne i występujące siły tarcia).

Przy obciążaniu wzrastającym momentem gnącym (czyste zginanie) odkształcenia i naprężenia się powiększają. Na początku zależność pomiędzy odkształceniem a naprężeniem jest liniowa (zakres sprężysty). Przy osiągnięciu przez skrajne włókna naprężeń uplastyczniających (włókna te ulegają odkształceniu plastycznemu) kończy się zakres sprężysty i zaczyna się zakres plastyczny. Przy dalszym wzroście obciążenia we włóknach skrajnych rośnie strefa odkształceń plastycznych i maleje strefa odkształceń sprężystych, w której zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem nadal pozostaje liniowa. W strefie odkształceń plastycznych zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem jest nieliniowa, włókna uległe odkształceniu plastycznemu zostają bowiem umocnione. Po odciążeniu pręta (zmniejszenie momentu do wartości zerowej) zachodzi częściowe wyprostowanie zakrzywionego pręta i jego w materiale pozostają naprężenia własne. We włóknach warstwy zewnętrznej, które podczas gięcia były rozciągane, pojawiają się ściskające naprężenia własne. We włóknach warstwy zewnętrznej, które podczas gięcia były ściskane, pojawiają się rozciągające naprężenia własne.

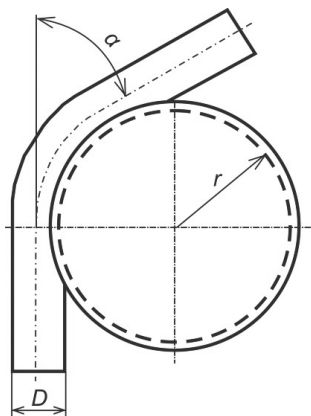
Częściowe wyprostowanie zakrzywionego pręta jest nazywane sprężynowaniem materiału. Zjawisko to zależy od:

- 1) właściwości mechanicznych materiału (R_e i R_m);
- 2) czynników geometrycznych (kształt elementu, wewnętrzny promień gięcia i grubość materiału);
- 3) czynników technologicznych (sposób, prędkość oraz końcowa siła gięcia, nazywana siłą dogniatania).

3.12.7. Próba zginania rury metalowej

Celem próby jest określenie podatności rury o przekroju okrągłym na odkształcenia plastyczne podczas zginania. Do badania można wykorzystać rury, których średnica zewnętrzna nie przekracza 65 mm.

Do badania należy pobrać próbkę o długości umożliwiającej przeprowadzenie zginania na oprzyrządowaniu używanej maszyny wytrzymałościowej. Należy zastosować maszynę wytrzymałościową, która posiada odpowiednie oprzyrządowanie do zginania metali. Jest ono nazywane wzornikiem i pomaga unikać owalizacji przekroju rury (rys. 3.72). Wzornik stosowany do zginania powinien posiadać rowek o profilu odpowiadającym zewnętrznej średnicy rury. Promień wzornika, tolerancja tego promienia oraz owalność rowka powinny być zgodne z wartościami podanymi w normie przedmiotowej badanego wyrobu.



Rys. 3.72. Schemat próby zginania rur: D – średnica rury badanej, α – kąt zginęcia rury, r – promień wzornika

Próbkę w postaci prostej rury należy poddać zginaniu za pomocą wzornika o określonym promieniu r (rys. 3.72). Podczas zginania wzornik powinien przebywać w ciągłym kontakcie z rurą zginaną. Proces zginania należy kontynuować do uzyskania kąta zginania podanego w odpowiedniej normie przedmiotowej. Jeżeli w normie przedmiotowej nie podano inaczej, to próbkę z rury spawanej lub zgrzewanej należy umieścić w taki sposób, aby szew był prostopadły do płaszczyzny zginania, tzn. znajdował się na osi obojętnej.

Wynik próby należy ocenić według odpowiedniej normy przedmiotowej. W przypadku braku takich wymagań należy przeprowadzić badanie wizualne. Jeżeli nie ujawniły się pęknięcia, naderwania lub pofałdowania powierzchni próbki, wynik badania uznaje się za pozytywny.

3.12.8. Próby tłoczności

Tłoczenie jest procesem, podczas którego blacha ulega jednocześnie gięciu, rozciąganiu jednoosiowemu, rozciąganiu dwuosiowemu i ściskaniu. Wynikiem tłoczenia jest wytłoczek.

Cel próby tłoczności stanowi określenie przydatności blachy do operacji tłoczenia [29]. Tłoczność materiału (podatność na tłoczenie) jest to zdolność ulegania odkształceniu plastycznemu z zachowaniem całkowitej spójności materiału podczas operacji tłoczenia.

Materiały stosowane do tłoczenia charakteryzują się anizotropią: płaską, normalną lub całkowitą. Anizotropia płaska polega na zróżnicowaniu właściwości mechanicznych w kierunkach leżących w płaszczyźnie blachy. Anizotropia normalna polega na posiadaniu przez blachę odmiennych właściwości mechanicznych w kierunku grubości blachy i w płaszczyźnie blachy. Anizotropia całkowita polega na posiadaniu odmiennych właściwości mechanicznych we wszystkich kierunkach.

Tłoczność można określić za pomocą prób: Erichsena, Swifta (próba miseczkowa), Fukui i Engelhardta–Grossa.

Próbie Erichsena wykonuje się w celu określenia podatności na tłoczenie na zimno cienkich blach i bednarki o grubości $g \geq 0,1$ mm i szerokości $b \geq 13$ mm. Próba polega na powolnym wtlaczaniu kulki (stempla z kulistym zakończeniem) w próbkę dociśniętą do matrycy za pomocą dociskacza. Średnica kulki i średnica otworu matrycy są zależne od grubości badanej blachy. Wtlaczanie należy przerwać, gdy ujawnią się pęknięcia w próbce. Wynik próby Erichsena stanowi średnią arytmetyczną wyników pomiarów głębokości trzech wtląceń.

Próba Swifta polega na kształtowaniu miseczki z próbki okrągłej za pomocą stempla płaskiego. Po badaniu wyznacza się graniczny współczynnik tłoczności, będący stosunkiem największej średnicy niepękniętej próbki poddanej tłoczeniu do średnicy stempla.

Próba Fukui polega na przepychaniu bez docisku stemplem o czole półkulistym lub płaskim próbki w kształcie krążka przez stożkową matrycę pierścieniową. Wynikiem badania jest głębokość tłoczenia, przy której nie ujawniły się pęknięcia lub pofałdowania.

Próba Engelhardta–Grossa polega na tłoczeniu na zimno z odcinka blachy lub taśmy miseczki o płaskim dnie. Wynik badania stanowi procentowa względna różnica największej siły tłoczenia niepowodującej pęknięcia i siły powodującej pęknięcie dna miseczki.

3.12.9. Przygotowanie raportu z badań

Próba rozciągania pierścienia wyciętego z rury metalowej

W raporcie z badań należy podać:

- 1) numer normy [67] i numer normy przedmiotowej;
- 2) identyfikację badanych próbek (materiał rury);
- 3) wymiary pobranych próbek;
- 4) wynik próby.

Próba roztlaczania rury metalowej

W raporcie z badań należy podać:

- 1) numer normy [64] i numer normy przedmiotowej;
- 2) identyfikację badanych próbek (materiał rury);
- 3) wymiary pobranych próbek;
- 4) kąt rozwarcia β trzypienia stożkowego;

- 5) wynik próby (maksymalna średnica zewnętrzna rury po badaniu albo względne roztlóczenie, podane w procentach początkowej średnicy zewnętrznej rury).

Próba roztlaczania pierścienia wyciętego z rury metalowej

W raporcie z badań należy podać:

- 1) numer normy [66] i numer normy przedmiotowej;
- 2) identyfikację badanych próbek (materiał rury);
- 3) wymiary pobranych próbek;
- 4) zbieżność trzpienia stożkowego;
- 5) wymagany stopień roztlaczania;
- 6) wynik próby.

Próba spłaszczania rury metalowej

W raporcie z badań należy podać:

- 1) numer normy [63] i numer normy przedmiotowej;
- 2) identyfikację badanych próbek (materiał rury);
- 3) wymiary pobranych próbek;
- 4) odległość pomiędzy płytami dociskowymi (uzyskany odstęp pomiędzy płytami dociskowymi, podany w normie przedmiotowej);
- 5) położenie spoiny (w przypadku rur spawanych);
- 6) wynik próby.

Próby tłoczności

W raporcie z badań należy podać:

- 1) metodę tłoczności wykorzystaną w badaniu;
- 2) identyfikację badanych próbek;
- 3) wymiary pobranych próbek;
- 4) wynik próby.

Próba zginania rury metalowej

W raporcie z badań należy podać:

- 1) numer normy [62] i numer normy przedmiotowej;
- 2) identyfikację badanych próbek (materiał rury);
- 3) wymiary pobranych próbek;
- 4) kąt gięcia i promień wzornika;
- 5) ułożenie spoiny w stosunku do płaszczyzny zginania (w przypadku rur spawanych lub zgrzewanych);
- 6) wynik próby.

3.13. Badanie złączy spawanych metali

3.13.1. Wstęp

Nierozłączne połączenie konstrukcyjne metali można uzyskać za pomocą:

- a) spawania (miejscowe stopienie metali z dodatkiem lub bez dodatku spoiwa powoduje powstanie złącza spawanego);
- b) zgrzewania (połączenie dociskowe miejscowo uplastycznionych metali wskutek nagrzewania bez zastosowania metalu dodatkowego powoduje powstanie złącza zgrzewanego);
- c) lutowania (łączenie metali za pomocą stopów zwanych lutami, których temperatura topnienia jest znacznie niższa od temperatury topnienia metali łączonych).

Złącze spawane składa się z materiału rodzimego i spoiny, która obejmuje przetopiony w procesie spawania materiał rodzimy oraz dodatkowy (stopiwo). Na styku tych materiałów występuje pas materiału rodzimego o strukturze zmienionej pod wpływem ciepła wydzielanego podczas spawania. Pas ten jest nazywany strefą wpływu ciepła (SWC lub *heat affected zone*), a jego szerokość zależy od ilości dostarczonej energii oraz stopnia skupienia źródła ciepła. Wskutek zmian strukturalnych zachodzących podczas powstawania złącza spawanego charakteryzuje się ono niejednorodną budową oraz posiada niejednorodne właściwości mechaniczne w obszarze *spoiny, strefy wpływu ciepła i materiału rodzimego*.

Wytrzymałość złącza spawanego zależy od jakości jego wykonania [17]. Określa się ją za pomocą badań niszczących lub badań nieniszczących. Spośród badań niszczących najczęściej stosuje się [24]:

- a) statyczną próbę rozciągania doczołowych złączy spawanych metali;
- b) statyczną próbę rozciągania próbek poprzecznych spawanych złączy metali;
- c) statyczną próbę rozciągania próbek wzdłużnych ze spoin spawanych złączy metali;
- d) próbę udarności spawanych złączy metali;
- e) próbę zginania spawanych złączy metali;
- f) próbę twardości złączy spawanych metali;
- g) próbę łamania złączy spawanych metali.

O wytrzymałości złącza spawanego można także wnioskować na podstawie wad ujawnionych podczas badania wizualnego:

- a) spoina o wklęsłym licu obniża wytrzymałość złącza wskutek posiadania zmniejszonego przekroju poprzecznego;
- b) gruby nadlew spoiny prowadzi do miejscowego usztywnienia i jest przyczyną koncentracji naprężeń;
- c) spoina pachwinowa o nieregularnym kształcie powoduje nierównomierne obciążenie złącza, co prowadzi do obniżenia jego wytrzymałości;
- d) brak przetopu w obciążonym dynamicznie spawanym złączu działa jak karb i zmniejsza czynną grubość spoiny, prowadząc do obniżenia wytrzymałości złącza;

- e) rozlania (utworzone na skutek przechodzenia ostatniej warstwy stopiwa poza brzeg spoiny, przy czym stopiwo zalewa metal rodzimy, nie wtapiając się w niego) i nawisy (będące efektem niedokładnego przetopu materiału spoiny z materiałem spawanym) obniżają wytrzymałość zmęczeniową spoiny;
- f) podtopienia na brzegach lica powodują zmniejszenie przekroju złącza oraz działają jak karby przy obciążeniach dynamicznych, prowadząc do obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej złącza;
- g) przyklejenia (miejscowe braki wtopienia pomiędzy ściegami spoiny lub spoiną a ściankami łączonych elementów) obniżają wytrzymałość złącza.

3.13.2. Statyczna próba rozciągania doczołowych złączy spawanych metali

Celem statycznej próby rozciągania doczołowych złączy spawanych jest określenie wytrzymałości na rozciąganie R_m , miejsca zerwania, charakteru przelomu oraz rodzaju i liczby wad spawalniczych lub materiałowych występujących na przelomie. Badanie należy przeprowadzić na podstawie wytycznych normy PN-88/M-69710 [35]. Do badania wykorzystuje się próbki płaskie, rurowe obwodowe i próbki prętów. Badania powinny być prowadzone na podstawie:

- a) próbki A (ma długość pomiarową) – jest stosowana do wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie R_m złącza płaskiego lub rurowego obwodowego o średnicy zewnętrznej większej niż 51 mm;
- b) próbki B (nie ma długości pomiarowej) – jest stosowana do wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie R_m złącza płaskiego lub rurowego obwodowego o średnicy zewnętrznej mniejszej lub równej niż 51 mm;
- c) próbki C – jest stosowana do wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie R_m złącza rurowego obwodowego w całości o średnicy zewnętrznej mniejszej lub równej 51 mm; do badania tej próbki dodatkowo należy wykorzystać sworznie, które podczas rozciągania są mocowane wewnątrz części uchwytowej próbki w celu uniknięcia zniekształcenia jej przekroju poprzecznego podczas jej rozciągania;
- d) próbki D – jest stosowana do wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie R_m złącza prętów.

Podczas przygotowywania próbki do badań należy wyrównać powierzchnię złącza z powierzchnią materiału rodzimego próbki za pomocą obróbki wiórowej. Wymagane jest usunięcie z każdej powierzchni próbki nadlewu spoiny i wypływki (rozlewu). Należy zagwarantować, aby rysy po obróbce wiórowej nie przebiegały w poprzek próbki, gdyż obniżają wytrzymałość złącza. Niedopuszczalne jest stosowanie metod obróbki wiórowej do usuwania zewnętrznych wad złącza spawanego. Ze spoiny czołowej rury o średnicy zewnętrznej mniejszej lub równej 51 mm należy usunąć tylko nadlewy zewnętrzne. W przypadku, gdy elementy złącza płaskiego mają różne grubości, należy zmniejszyć powierzchnię elementu grubszego w celu jej zrównania z powierzchnią elementu cieńszego. Zabieg ten należy wykonać wyłącznie za pomocą obróbki wiórowej.

Przed zamocowaniem próbki w uchwytach maszyny wytrzymałościowej należy przeprowadzić badanie wizualne próbki i odnotować ujawnione wady złącza spawanego. Następnie należy zamocować próbkę w uchwytach maszyny wytrzymałościowej i przeprowadzić statyczną próbę rozciągania, zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-2:2011 [59]. Po badaniu należy określić jej wytrzymałość na rozciąganie R_m , miejsce zerwania, charakter przełomu, rodzaj i liczbę występujących na przełomie wad spawalniczych lub materiałowych.

3.13.3. Statyczna próba rozciągania próbek poprzecznych spawanych złączy metali

Celem statycznej próby rozciągania próbek poprzecznych spawanych złączy metali jest określenie wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz położenia przełomu spawanego złącza doczołowego uzyskanego przy zastosowaniu dowolnego procesu spawalniczego. Badanie należy przeprowadzić na podstawie wymagań normy PN-EN ISO 4136:2013-05 [49].

Próbki do badań należy pobrać za pomocą takiej metody mechanicznej lub termicznej, która nie zmienia właściwości mechanicznych materiału próbek. Każda próbka powinna zostać pobrana ze złącza spawanego w taki sposób, aby po obróbce mechanicznej oś spoiny znajdowała się w środku długości pomiarowej próbki. W protokole badań należy odnotować miejsce pobierania próbek do badań. Jeżeli badane złącze spawane lub próbki do badań są obrabiane cieplnie, to fakt ten należy odnotować w protokole badań. Na końcowym etapie przygotowania próbki należy usunąć nadlew spoiny i wyrównać powierzchnię próbki, stosując takie metody obróbki skrawaniem, które nie zmieniają właściwości mechanicznych materiału przez zgniot lub nagrzanie. Trzeba przy tym zagwarantować, aby na całej długości części pomiarowej próbki nie występowały rysy i karby usytuowane poprzecznie do osi próbki, z wyjątkiem podtopień, które można usuwać wyłącznie w przypadku, gdy wymaga tego norma wyrobu.

Po zamocowaniu próbki w uchwytach maszyny wytrzymałościowej należy przeprowadzić statyczną próbę rozciągania, zgodnie z normą [59]. Po zerwaniu próbki należy określić wytrzymałość na rozciąganie R_m i zlokalizować miejsce zerwania próbki, określić wygląd powierzchni przełomu próbki oraz rodzaj, wielkość i liczbę niezgodności spawalniczych ujawnionych na przełomie. Jeżeli na przełomie występują „rybie oczy”, to w protokole badań należy odnotować lokalizację ich obszarów centralnych. W przypadku, gdy wymagane jest ustalenie dokładnego umiejscowienia spoiny, próbkę należy wytrawić odpowiednim odczynikiem ujawniającym jej makrostrukturę.

3.13.4. Statyczna próba rozciągania próbek wzdłużnych ze spoin złączy spawanych metali

Celem statycznej próby rozciągania okrągłych próbek wzdłużnych wykonanych ze spoin złączy spawanych jest określenie własności mechanicznych spoin złączy spawanych doczołowo, które można otrzymać przy zastosowaniu dowolnego procesu spawalniczego. Badanie należy przeprowadzić na podstawie normy PN-EN 876:1999 [44].

Próbkę okrągłą do badań należy pobrać wzdłuż spoiny złącza spawanego doczołowo wyrobu lub płyty próbnej, przy czym równoległa część próbki powinna obejmować wyłącznie spoinę. W protokole badań należy określić miejsce pobrania próbki z elementu próbnego oraz położenie tego elementu w badanym wyrobie/złączy. Jeżeli próbka nie jest wycinana ze środka grubości złącza spawanego, to w protokole badań należy umieścić odległość od powierzchni spoiny. W przypadku, gdy badane złącze zostało obrabione cieplnie, fakt ten należy odnotować w protokole badań.

Próbki do badań należy wycinać ze środka spoiny i przygotowywać za pomocą takich metod obróbki mechanicznej, które nie wywołują zgniotu i nadmiernego nagrzania materiału próbki. Zalecane jest, aby średnica próbki do badań wynosiła 10 mm. Średnica próbki o przekroju pomniejszonym nie może być mniejsza niż 4 mm. Po wykonaniu próbki należy oznakować jej długość pomiarową w celu oszacowania jej wydłużenia po rozerwaniu.

Po zamocowaniu próbki w uchwytach maszyny wytrzymałościowej należy przeprowadzić statyczną próbę rozciągania. Po wykonaniu badania trzeba określić własności wytrzymałościowe (granice plastyczności R_e i wytrzymałość na rozciąganie R_m) oraz własności technologiczne (wydłużenie procentowe po rozerwaniu A i przewężenie procentowe po rozerwaniu Z). Następnie należy określić rodzaj przelomu próbki oraz rodzaj, wielkość i liczbę niezgodności spawalniczych ujawnionych na przelomie. Jeżeli na przelomie występują „rybie oczy”, to w protokole badań trzeba odnotować lokalizację ich obszarów centralnych.

3.13.5. Próba udarności spawanych złączy metali

Celem próby udarności spawanych złączy metali jest określenie pracy łamania K próbki, którą pobrano z doczołowo spawanego złącza metali uzyskanego dowolną metodą spawania. Badanie należy przeprowadzić na podstawie wymagań norm: PN-EN ISO 148-1:2010 [46], PN-EN ISO 148-2:2009 [47] oraz PN-EN ISO 9016:2011 [69].

Przed wykonaniem próbek można zastosować trawienie makroskopowe w celu ustalenia linii wtopienia w spawanym złączy. Próbki do badań należy przygotować zgodnie z wymaganiami podanymi w normie [46] –Próba udarności metali sposobem Charpy’ego.

Próbka do badania udarności spawanych złączy metali powinna zostać pobrana z doczołowego złącza spawanego w kierunku prostopadłym do długości spoiny. Powinna ona posiadać karb U lub karb V, a jej geometryczne wymiary powinny być zgodne z normą [46] (próbka standardowa ma wymiary 55×10×10 mm). Oznakowanie próbki powinno zawierać rodzaj karbu oraz:

- a) symbol W, gdy próbka ma karb w osi środkowej spoiny, przy czym oś spoiny należy potraktować jako linię odniesienia dla danego położenia próbki;
- b) symbol H, gdy próbka ma środek karbu na linii wtopienia HAZ (*heat affected zone*), przy czym linię wtopienia należy potraktować jako linię odniesienia dla danego położenia próbki;
- c) symbol S, gdy próbka ma płaszczyznę z karbem równoległą do powierzchni elementu próbnego;

d) symbol T, gdy próbka ma płaszczyznę z karbem prostopadłą do powierzchni elementu próbnego.

W oznaczeniu próbki należy także podać odległość osi karbu od linii odniesienia a oraz odległość między górną stroną złącza (licem) a najbliższą powierzchnią pobieranej próbki b . Wielkości te należy zapisać w protokole w postaci: a/b .

Na przykład:

VWS a/b – oznacza, że: próbka ma karb typu V, pobrano ją z doczołowego złącza spawanego, płaszczyzna karbu jest równoległa do powierzchni elementu próbnego; odległość osi karbu od osi spoiny wynosi a , odległość między górną stroną tego złącza a najbliższą powierzchnią pobieranej próbki wynosi zaś b .

VHT $0/b$ – oznacza, że: próbka ma karb typu V, pobrano ją z doczołowego złącza spawanego, płaszczyzna karbu jest prostopadła do powierzchni elementu próbnego; środek osi karbu pokrywa się z linią wtopienia, odległość między górną stroną tego złącza a najbliższą powierzchnią pobieranej próbki wynosi zaś b .

Po wykonaniu badania próbki należy zweryfikować zgodnie z metodą podaną w normie PN-EN ISO 148-1:2010 [46].

3.13.6. Próba zginania spawanych złączy metali

Cele próby zginania spawanych złączy metali obejmują wyznaczenie ciągliwości materiału oraz określenie rodzaju i liczby niezgodności spawalniczych ujawnionych na powierzchni lub w pobliżu złącza poddanego próbie zginania. Próbę należy stosować do badania wyrobów metalowych spawanych lukowo. Badanie należy wykonać zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 5173:2010 [50]. Próbę zginania można przeprowadzić jako próbę zginania poprzecznego/wzdłużnego z rozciąganiem od strony grani/lica spoiny lub jako próbę zginania bocznego na próbkach pobranych z:

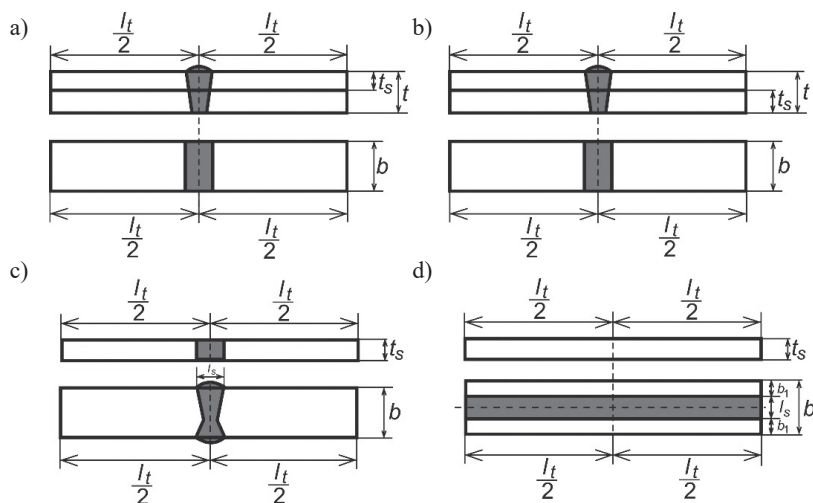
- złączy doczołowych;
- złączy doczołowych z blach platerowanych (złączy z blach platerowanych i złączy ze spoinami platerowanymi);
- elementów platerowanych bez spoin doczołowych.

Podczas badania próbka pobrana wzdłuż lub w poprzek złącza jest zginana w stałym kierunku w taki sposób, że jedna powierzchnia próbki jest rozciągana, a druga – ściskana. Dla złączy różnorodnych, w których materiał podstawowy i/lub spoiwo mają odmienne własności mechaniczne, należy przeprowadzić próbę zginania wzdłużnego z rozciąganiem od strony grani/lica spoiny. Próbę zginania bocznego należy wykonać tylko dla próbek, których grubość jest równa co najmniej 10 mm.

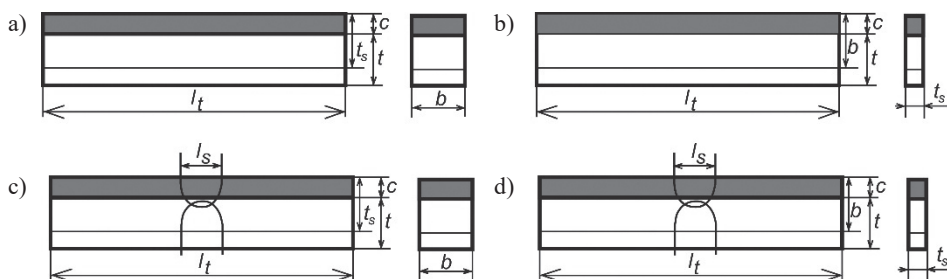
Badania mogą zostać przeprowadzone dla dziewięciu typów próbek do próby zginania:

- 1) poprzecznego złącza doczołowego z rozciąganiem od strony lica spoiny (FBB) (rys. 3.73a);
- 2) wzdłużnego złącza doczołowego z rozciąganiem od strony lica spoiny (FBB) (rys. 3.73d);

- 3) poprzecznego złącza doczołowego z rozciąganiem od strony grani spoiny (RBB) (rys. 3.73b);
- 4) wzdłużnego złącza doczołowego z rozciąganiem od strony grani spoiny (RBB) (rys. 3.73d);
- 5) bocznego złącza doczołowego (SBB) (rys. 3.73c);
- 6) od czoła z platerem bez spoiny czołowej (FBC) (rys. 3.74a);
- 7) bocznego z platerem bez spoiny czołowej (SBC) (rys. 3.74b);
- 8) bocznego i od czoła z platerem ze spoiną czołową, której plater ulega rozciąganiu (FBCB) (rys. 3.74c);
- 9) bocznego i od czoła z platerem ze spoiną czołową, w której przekrój poprzeczny plateru ulega rozciąganiu (SBCB) (rys. 3.74d).



Rys. 3.73. Próbkki do próby zginania: a) poprzecznego złącza doczołowego z rozciąganiem od strony lica spoiny (FBB); b) poprzecznego złącza doczołowego z rozciąganiem od strony grani spoiny (RBB); c) bocznego złącza doczołowego (SBB); d) wzdłużnego złącza doczołowego z rozciąganiem od strony lica/grani spoiny (FBB/RBB)



Rys. 3.74. Próbkki do próby zginania: a) od czoła z platerem bez spoiny czołowej (FBC); b) bocznego z platerem bez spoiny czołowej (SBC); c) bocznego i od czoła z platerem ze spoiną czołową, której plater ulega rozciąganiu (FBCB); d) bocznego i od czoła z platerem ze spoiną czołową, w której przekrój poprzeczny plateru ulega rozciąganiu (SBCB)

Na powyższych rysunkach przyjęto oznaczenia i określenia zgodnie z przedstawionymi w tab. 3.7.

Tabela 3.7

Oznaczenia i określenia wymiarów geometrycznych próbek do zginania wykonanych ze złączy spawanych

Oznaczenie	Określenie	Jednostka
t_s	Grubość próbki	mm
b	Szerokość próbki	mm
b_1	Odległość brzegu próbki od linii wtopienia	mm
c	Grubość plateru	mm
l_s	Największa szerokość spoiny po obróbce	mm
l_t	Długość całkowita próbki	mm
t	Grubość złącza spawanego lub blachy podstawowej pod warstwą plateru	mm

Próbka do próby zginania poprzecznego/wzdłużnego złącza doczołowego z rozciąganiem od strony lica spoiny (FBB) – jest to próbka, której powierzchnię rozciągania stanowi strona o większej szerokości spoiny lub strona, od której spawanie łukowe zostało wykonane jako pierwsze.

Próbka do próby zginania poprzecznego/wzdłużnego złącza doczołowego z rozciąganiem od strony grani spoiny (RBB) – jest to próbka, której powierzchnia rozciągania jest stroną przeciwną do strony rozciąganej próbki FBB.

Próbka do próby zginania bocznego złącza doczołowego (SBB) – jest to próbka, której przekrój poprzeczny spoiny jest poddany rozciąganiu.

Próbka do próby zginania od czoła z platerem bez spoiny czołowej (FBC) – jest to próbka, której plater jest poddany rozciąganiu.

Próbka do próby zginania bocznego z platerem bez spoiny czołowej (SBC) – jest to próbka, której poprzeczny przekrój plateru jest rozciągany. Próbka ta jest wykorzystywana zarówno do zginania poprzecznego, jak i do zginania wzdłużnego.

Próbka do próby zginania bocznego i od czoła z platerem ze spoiną czołową (FBCB lub SBCB) – jest to próbka, której plater (FBCB) lub przekrój poprzeczny plateru (SBCB) jest rozciągany, a próbka obejmuje spoinę czołową.

Do próby zginania poprzecznego złączy doczołowych próbki powinny zostać pobrane poprzecznie do spawanego złącza wyrobu, w taki sposób, aby oś spoiny znajdowała się pośrodku badanej próbki.

Do próby zginania wzdłużnego złączy doczołowych próbki powinny zostać pobrane wzdłuż spawanego złącza wyrobu, w taki sposób, aby oś spoiny znajdowała się pośrodku badanej próbki.

Pobieranie próbek z platerem należy wykonać zgodnie z wymaganiami podanymi w odpowiedniej normie przedmiotowej.

Złączy spawanych i próbek do badań nie należy poddawać obróbce cieplnej, jeżeli w odpowiedniej normie przedmiotowej nie ma takiego wymagania. W przypadku, gdy została przeprowadzona obróbka cieplna, fakt ten należy odnotować w protokole badań.

Próbki do badań należy wycinać takimi sposobami mechanicznymi lub termicznymi, które nie zmieniają własności mechanicznych materiałów pobieranych próbek i nie powodują inicjacji zjawisk metalurgicznych zmieniających wynik próby zginania.

Próbki do badań należy przygotować przy użyciu takich sposobów obróbki skrawaniem, które nie zmieniają własności fizycznych materiału rodzimego i spoiny. Należy przy tym unikać utwardzania i nagrzewania materiału próbki.

Na podstawie norm przedmiotowych badanego złącza spawanego należy zagwarantować odpowiedni stosunek między grubością próbki a a średnicą trzpienia gnącego D (rys. 3.75a) [60]. Długość próbki do badań L_1 powinna być większa lub równa sumie odległości między podporami urządzenia do zginania L_1 oraz ich średnicy D_1 . Długość ta powinna być zgodna z normami przedmiotowymi badanego złącza spawanego.

Krawędzie badanej próbki powinny być zaokrąglone po stronie powierzchni rozciąganej. Na całej długości pomiędzy środkami podpór L_1 (rys. 3.75a) powierzchnia próbki nie powinna mieć zarysowań i/lub karbów w kierunku prostopadłym do osi wzdłużnej próbki. Jednak z powierzchni próbki nie można usuwać podtopień.

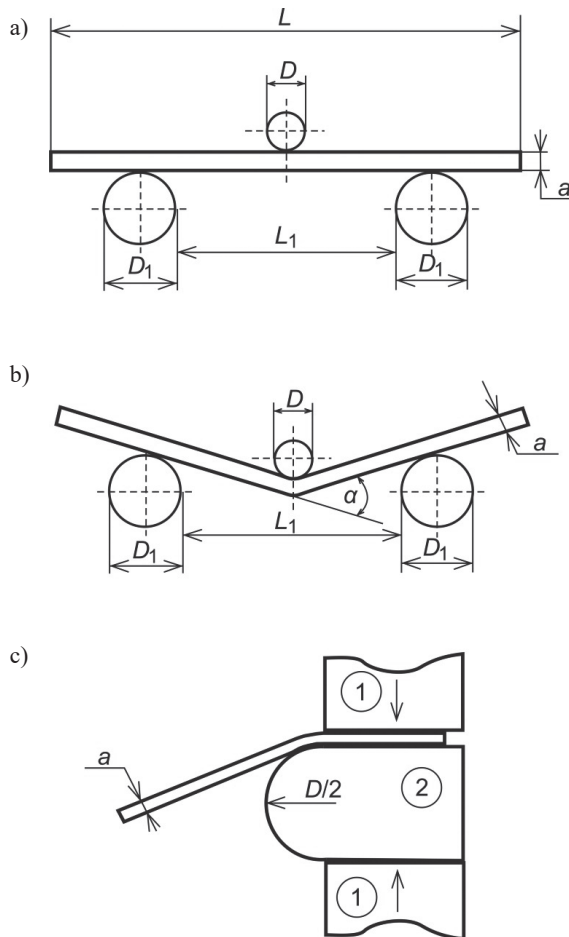
Przed próbą zginania za pomocą lekkiego nadtrawienia można zidentyfikować kształt oraz umiejscowienie strefy lub linii wtopienia.

Próbę zginania należy przeprowadzić na maszynie wytrzymałościowej, która posiada odpowiednie oprzyrządowanie do realizacji tej próby (w postaci zginania trójpunktowego lub zginania w zacisku) oraz umożliwia płynną regulację obciążenia (rys. 3.75). W celu realizacji próby zginania w postaci zginania trójpunktowego należy zastosować dwie podpory i trzpień (rys. 3.75a). Podczas zginania spoina próbki powinna się znajdować w środku między podporami (z wyjątkiem próbek wzdłużnych) i obciążenie powinno narastać w sposób ciągły w kierunku prostopadłym do powierzchni próbki.

Próbkę do badań należy zainstalować w urządzeniu do zginania na maszynie wytrzymałościowej i płynnie obciążyć w stałym kierunku, aż od uzyskania wymaganego kąta zgięcia α . Próbkę do badań pobraną wzdłuż lub poprzek złącza spawanego należy obciążyć w taki sposób, aby w czasie próby zginania została rozciągnięta tylko jedna powierzchnia złącza lub jego przekroju poprzecznego.

Pozytywny wynik próby zginania uzyskuje się wówczas, gdy próbka w czasie zginania się nie złamała i została zgięta o kąt $(180-\alpha)^\circ$ (rys. 3.75b) podany w normie przedmiotowej. Po próbie zginania należy przeprowadzić badanie wizualne na zewnętrznych i bocznych po-

wierzchniach próbki. Niezgodności spawalnicze i wady materiałowe ujawnione na próbce należy opisać w protokole badania.



Rys. 3.75. Urządzenia do przeprowadzenia próby zginania: a, b) urządzenie z dwiema podporami i trzpieniem; c) urządzenie do zginania w zacisku

3.13.7. Przygotowanie raportu z badań

Statyczna próba rozciągania doczołowych złączy spawanych metali

Raport z badań powinien zawierać:

- 1) tytuł badania i numery norm [35] oraz [58];
- 2) dane dotyczące gatunku materiału rodzimego, rodzaju złącza spawanego, metody spawania, pozycji spawania, gatunku materiału dodatkowego;
- 3) metodę obróbki cieplnej złącza spawanego;
- 4) grubość materiału blachy albo grubość ścianki rury lub średnicę pręta;

- 5) oznaczenie próbek;
- 6) wymiary i początkowe powierzchnie przekrojów poprzecznych próbek;
- 7) wyniki próby (maksymalne siły obciążające podane w [daN] oraz wytrzymałości na rozciąganie R_m podane w [MPa]);
- 8) opisy miejsc zerwania próbek, charakterystyki przełomów i ewentualne wady;
- 9) dane dotyczące maszyny wytrzymałościowej (typ, zakres pomiarowy i dokładność wskazań układu pomiarowego siły);
- 10) temperaturę badania.

Statyczna próba rozciągania próbek poprzecznych spawanych złączy metali

Raport z badań powinien zawierać:

- 1) tytuł badania i numery norm [58] oraz [49];
- 2) oznaczenia identyfikujące próbki;
- 3) gatunek materiału rodzimego i materiału dodatkowego;
- 4) położenie i kierunki pobierania próbek;
- 5) kształty, wymiary i szkice próbek przed badaniem;
- 6) wymiary próbek po badaniu;
- 7) wyniki próby (wartość F_m i wartość R_m , przy czym naprężenia należy określać w [N/mm²], oraz opis powierzchni przełomu);
- 8) rodzaj, wymiary i liczbę niezgodności spawalniczych oraz wad materiałowych wyznaczonych za pomocą badania wizualnego na przełomie próbki;
- 9) dane dotyczące maszyny wytrzymałościowej (typ, maksymalne obciążenie oraz stosowany zakres pomiarowy siłomierza);
- 10) temperaturę badania.

Statyczna próba rozciągania próbek wzdłużnych ze spoin złączy spawanych metali

Raport z badań powinien zawierać:

- 1) tytuł badania i numery norm [58] oraz [44];
- 2) oznaczenia identyfikujące materiał próbek;
- 3) położenie i kierunek pobierania próbek;
- 4) kształt, wymiary i szkice próbek przed badaniem oraz ich średnice w [mm];
- 5) wymiary próbek po badaniu;
- 6) wyniki próby (charakterystyki rozciągania, wyznaczone wartości własności mechanicznych (do określenia naprężenia należy zastosować jednostkę [N/mm²]) oraz opisy przełomów);
- 7) rodzaj, wymiary i liczbę zauważonych niezgodności spawalniczych oraz wad materiałowych;
- 8) dane dotyczące maszyny wytrzymałościowej (typ, maksymalne obciążenie i stosowany zakres pomiarowy siłomierza);
- 9) temperaturę badania.

Próba udarowości spawanych złączy metali

W raporcie z badań należy umieścić:

- 1) tytuł badania i numery norm [46] i [69];
- 2) rodzaje i wymiary próbek do badań;
- 3) oznaczenie identyfikujące materiał rodzimy próbek i materiał dodatkowy;
- 4) miejsce i kierunki pobierania próbek;
- 5) szkice i oznaczenia próbek;
- 6) temperaturę badania;
- 7) wyniki próby (praca łamania K (tzn. KU lub KV) [J] oraz udarność KC [J/cm²]);
- 8) opis rodzaju i miejsca przełomu;
- 9) opis rodzaju i wielkości stwierdzonych niezgodności spawalniczych oraz materiałowych;
- 10) identyfikację młota wahadłowego (typ, znak fabryczny, rok produkcji, numer serii, zakres pomiarowy).

Próba zginania spawanych złączy metali

W raporcie z badań należy umieścić:

- 1) tytuł badania, numer normy [50] oraz numery norm przedmiotowych wyrobu hutniczego;
- 2) dane identyfikujące próbki do badań (rodzaj materiału rodzimego, rodzaj zastosowanej obróbki cieplnej, numer wytopu, kierunek osi próbki względem wyrobu itd.);
- 3) kształt i wymiary próbek do badań;
- 4) rodzaje i symbole próby (zginanie z rozciąganiem od strony lica lub grani spoiny, próba zginania poprzecznego, bocznego lub wzdłużnego);
- 5) metodę badania i warunki przeprowadzenia próby, w tym dane dotyczące urządzenia do przeprowadzenia próby zginania (średnica trzpienia gnącego, odległość między podporami rolkowymi itd.) oraz temperaturę przeprowadzenia próby;
- 6) wyniki próby zginania: kąt zgięcia, rodzaje przełomów, wydłużenia długości próbek (jeżeli są wymagane) oraz rodzaje i wymiary zaobserwowanych niezgodności spawalniczych występujących po przeprowadzeniu próby.

3.14. Wybrane aspekty mechaniki pękania

3.14.1. Wstęp

Mechanika pękania zajmuje się wyznaczaniem parametrów odporności materiału na inicjację wzrostu pęknięć (szczelin zmęczeniowych). Przyczyną inicjacji pęknięć są ostre karby, szczeliny i nieciągłości materiałowe.

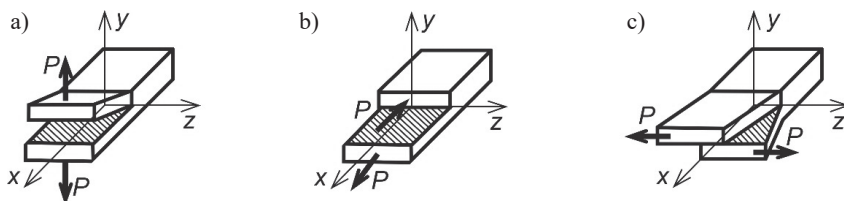
Badaniem odkształceń w materiale zajmują się liniowo-sprężysta mechanika pękania (LSMP) oraz nieliniowo-sprężysta mechanika pękania. Przy rozciąganiu próbki metalowej wykonanej z materiału idealnie kruchego (liniowo-sprężystego) w strefach przylegających do wierzchołków szczelin powstają odkształcenia sprężyste. Próbka z takiego materiału pęka

w sposób kruchy bez widocznych odkształceń plastycznych. Powstanie i rozwój odkształceń sprężystych w tym przypadku można opisać za pomocą LSMP.

Przy rozciąganiu próbki metalowej wykonanej z materiału sprężysto-plastycznego i mało ciągliwego w strefach przylegających do wierzchołków szczelin powstają odkształcenia plastyczne. Zachodzenie i rozwój tych odkształceń można opisać za pomocą zasad nieliniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia. W przypadku, gdy odkształcenia plastyczne w skali makro występują dopiero po inicjacji pęknięcia, można zastosować zasady LSMP z jednoczesnym użyciem współczynników korekcyjnych.

Wyróżniamy trzy podstawowe typy obciążenia elementów z pęknięciami (rys. 3.76):

- I typ obciążenia – schemat ten charakteryzuje się rozwarciem płaszczyzn symetrycznie do płaszczyzny, w której znajduje się pęknięcie;
- II typ obciążenia – schemat ten przedstawia poślizg (ścięcie) w kierunku płaszczyzny pęknięcia;
- III typ obciążenia – schemat ten przedstawia przemieszczenie w płaszczyźnie pęknięcia w kierunku osi z .

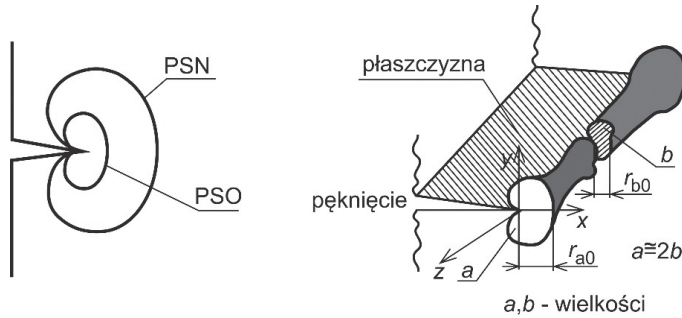


Rys. 3.76. Podstawowe obciążenia elementu ze szczeliną:
a) I typ obciążenia; b) II typ obciążenia; c) III typ obciążenia

W celu wyznaczenia kształtu strefy plastycznej w wierzchołku szczeliny, która powstaje wskutek obciążenia, należy kolejno wyznaczyć [12]:

- 1) osobliwe pola naprężeń za pomocą zasad LSMP;
- 2) wartości naprężeń głównych;
- 3) kształt strefy plastycznej za pomocą kryterium plastyczności (*Hubera–Misesa–Hencky’ego* (H-M-H) lub *Coulomba–Treski–Guesta* (C-T-G)).

Występowanie płaskiego stanu naprężenia (PSN) i płaskiego stanu odkształcenia (PSO) zależy od grubości elementu. W bardzo cienkich elementach (np. blachach) panuje PSN. W elementach grubych dominuje PSO, ale na ich powierzchniach zewnętrznych występuje PSN. Należy zwrócić uwagę, że obszar strefy odkształcenia plastycznego jest odmienny dla PSO i dla PSN (rys. 3.77).



Rys. 3.77. Kształt stref plastycznych w wierzchołku szczeliny płyty według kryterium plastyczności H-M-H (rozwiązania uzyskano przy zastosowaniu zasad teorii sprężystości dotyczących pola naprężeń)

W ciałach grubych w wierzchołku szczeliny dominuje PSO, strefy odkształceń plastycznych są zaś znikomo małe w stosunku do grubości. Z kolei w ciałach cienkich w wierzchołku szczeliny występuje PSN i strefa odkształcenia plastycznego przybiera kształt pasma o grubości w przybliżeniu równej grubości elementu.

Ze względu na to, że strefy plastyczne ograniczają w pewnym stopniu możliwość kruchoego pęknięcia, któremu towarzyszy lawinowy wzrost szczeliny prowadzący do zniszczenia elementu, przyłożone do ciała cienkiego obciążenie zewnętrzne wywołujące wzrost szczeliny może być większe w porównaniu z obciążeniem przyłożonym do ciała grubego.

Z badań doświadczalnych wynika, że w cienkiej płycie (będącej w PSN) powierzchnie rozwoju pęknięcia szczeliny przebiegają skośnie do płaszczyzny szczeliny pod kątem 45° . Zjawisko to jest nazywane zniszczeniem ukośnym. W płycie bardzo grubej (będącej w PSO) następuje z kolei zniszczenie płaskie. W płycie grubej (będącej wewnątrz w PSO, na zewnątrz zaś – w PSN) zachodzi zniszczenie płaskie z daszkami poślizgu.

Weryfikacja doświadczalna napotyka podstawowe trudności, gdyż techniki badawcze nie pozwalają precyzyjnie rozróżnić strefy odkształceń sprężystych od strefy odkształceń plastycznych. Ponadto badania prowadzone są na zewnętrznej powierzchni próbek i nie pozwalają na wizualizację obrazu zachowania materiału we wnętrzu próbki.

Założenia liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia są spełnione tylko wtedy, gdy odkształcenia plastyczne występujące na dnie karbu przed inicjacją pęknięcia są bardzo małe. W przeciwnym przypadku znaczna część energii pochłaniana jest przez odkształcenia plastyczne materiału, a nie na propagację pęknięcia, tzn. pokonywanie sił spójności materiału.

Współczynnik intensywności naprężeń w PSO K_I [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$] jest miarą intensywności pola naprężeń sprężystych w wierzchołku szczeliny rozwieranej siłą przyłożoną prostopadle do płaszczyzny symetrii rozwoju szczeliny. Dla I modelu obciążenia, w którym siła jest przyłożona prostopadle do płaszczyzny symetrii rozwoju szczeliny zmęczeniowej, współczynnik intensywności naprężeń K_I wynosi:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_y \cdot \sqrt{2\pi r}) \quad (3.107)$$

gdzie: r – odległość pomiędzy wierzchołkiem szczeliny a punktem pola naprężeń, w którym składowa naprężenia jest prostopadła do płaszczyzny szczeliny i równa σ_y .

Współczynnik intensywności naprężeń opisuje pole naprężeń (a także pole przemieszczeń) w bezpośrednim sąsiedztwie frontu szczeliny. Współczynnik ten zależy od rozmiarów szczeliny, wymiarów próbki (szczególnie jej grubości) i przyłożonego obciążenia zewnętrznego.

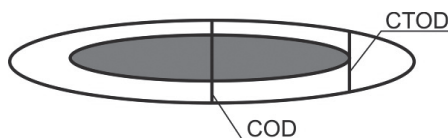
Pojawienie się w wierzchołkach szczeliny lokalnych odkształceń plastycznych zmniejsza sztywność elementu (zjawisko to nie jest uwzględnione w modelu ciała idealnie sprężystego). Z tego względu rozwiązania mechaniki liniowo-sprężystej można stosować tylko dla stanów PSO, w których można oszacować wartość krytyczną współczynnika intensywności naprężeń K_C .

Odporność na pęknięcie w płaskim stanie odkształcenia K_{Ic} [MPa·m^{1/2}] jest miarą odporności materiału na rozwój szczeliny, w której wierzchołku panuje PSO i jest ograniczony rozwój odkształcenia plastycznego. Odporność na pęknięcie w płaskim stanie odkształcenia K_{Ic} jest krytyczną wartością współczynnika intensywności naprężeń w płaskim stanie odkształcenia K_I .

Znając wartość K_{Ic} dla danego materiału i zadanego naprężenia w tym materiale, można określić dopuszczalną (krytyczną) wielkość istniejących w nim pęknięć (wad). Z kolei, znając wielkości obecnych w materiale pęknięć oraz wartość K_{Ic} dla danego materiału, można określić maksymalną wartość naprężeń, które dana konstrukcja może bezpiecznie przenosić.

Z badań doświadczalnych wynika, że im wyższa jest granica plastyczności materiału, tym mniejszą ma on odporność na pęknięcie.

W przypadku rozciągania próbki metalowej wykonanej z materiału ciągliwego przyrost długości szczeliny jest poprzedzony rozwarciem jej brzegów, w materiale zachodzą bowiem odkształcenia plastyczne hamujące lawinowy wzrost tej szczeliny. Z tego względu dla materiałów ciągliwych miarami odporności na pęknięcie są charakterystyczne przemieszczenie brzegów szczeliny pierwotnej, nazywane COD (*crack opening displacement*), oraz rozwarcie w punkcie odpowiadającym położeniu wierzchołka szczeliny pierwotnej, nazywane CTOD (*crack tip opening displacement*) (rys. 3.78).

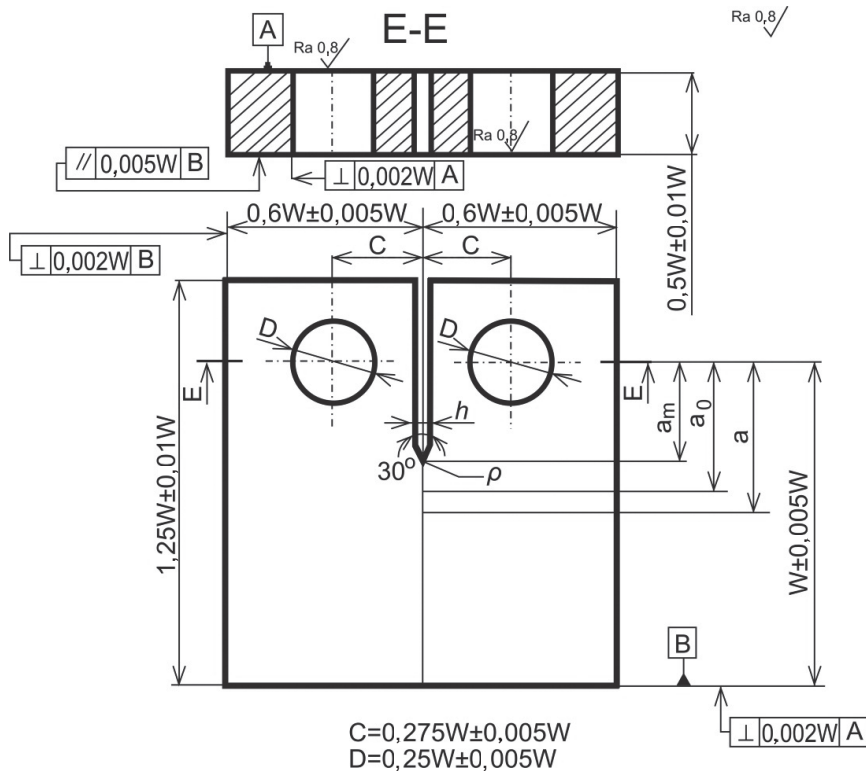


Rys. 3.78. Rozwarcie brzegów szczeliny

3.14.2. Wyznaczenie odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia

W liniowo-sprężystej mechanice pękania współczynnik intensywności naprężeń dla I sposobu obciążenia K_I nie może przekraczać wartości odporności materiału na pękanie K_{Ic} . Wyznaczenie wartości K_{Ic} w warunkach laboratoryjnych przeprowadza się na podstawie wytycznych podanych w normie PN-EN ISO 12737:2006 [45]. Wyznaczenia wartości współczynnika K_I można dokonać jedynie dla próbki będącej w PSO, którego istnienie zależy od grubości próbki i wymiarów istniejącego w niej pęknięcia.

Do badania odporności na pękanie w PSO wykorzystuje się dwa rodzaje próbek: próbki zwarte (rys. 3.79) i próbki do zginania.



Rys. 3.79. Próbkę zwartą: grubość próbki B jest równa $0,5W$

Warunkiem prawidłowego wyznaczenia odporności materiału na pękanie w PSO jest spełnienie następujących trzech warunków:

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{R_e} \right)^2 \quad (3.108)$$

$$(W - a) \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{R_e} \right)^2 \quad (3.109)$$

$$a \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{R_e} \right)^2 \quad (3.110)$$

gdzie: B – grubość próbki,
 a – długość pęknięcia,
 W – wymiar charakterystyczny,
 R_e – granica plastyczności.

Bezpośrednie wykorzystanie warunków (3.108)–(3.110) do określania koniecznych wymiarów próbek jest niemożliwe, gdyż podane zależności wymagają znajomości K_{IC} , której wartość przed wykonaniem badania nie jest znana. Z tego względu norma zaleca minimalne konieczne wymiary w zależności od stosunku granicy plastyczności R_e i modułu Younga E (tab. 3.8).

Tabela 3.8

Orientacyjna grubość próbki w zależności od stosunku R_e/E [2]

$R_e/E \cdot 10^3$	B [mm]	$R_e/E \cdot 10^3$	B [mm]
[5,0; 5,7)	75	[7,1; 7,7]	32
[5,7; 6,2)	63	(7,7; 8,0]	25
[6,2; 6,5)	50	(8,0; 8,5]	20
[6,5; 6,8)	44	(8,5; 10]	12
[6,8; 7,1)	38	>10	7

Próba określenia odporności materiału na pęknięcie w PSO jest ważna, gdy łącznie są spełnione dwa podstawowe warunki:

- 1) wzrost szczeliny zachodzi w ściśle określonej płaszczyźnie (dla próbki zwartej – w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku działania siły rozciągającej);
- 2) brzeg szczeliny ma liniowy kształt, który powinien być prostopadły do obu bocznych ścian próbek (równomierny przyrost szczeliny po obu stronach próbki).

Należy podkreślić, że kierunek rozwoju szczeliny jest trudno przewidywalny. W celu spełnienia podanych warunków do próbki badanej wprowadza się wstępną szczelinę zmęczeniową, która powinna wychodzić z karbu ostrzowego, nazywanego starterem. Kształt karbu powinien być dobrany tak, aby wzrost szczeliny zachodził w pożądanym płaszczyźnie. Ponadto karb należy wykonać taką metodą, która nie zmieni struktury materiału w okolicy karbu. W celu unikania zakrzywienia frontu szczeliny należy przygotować próbki do badania, w których:

- 1) szerokość próbki W [mm] jest równa podwójnej grubości próbki B [mm];
- 2) długość szczeliny a_0 (składająca się z karbu mechanicznego i początkowego pęknięcia zmęczeniowego (rys. 3.79)) mieści się w przedziale $0,45 \div 0,55 \cdot W$ [mm].

Następnie należy obciążyć próbkę niskocyklicznym obciążeniem zmęczeniowym, w taki sposób, aby uzyskać wstępną szczelinę o długości nie mniejszej niż $\max\{0,025 \cdot W; 1,3 \text{ mm}\}$. Szczelina ta powinna wychodzić z wierzchołka karbu mechanicznego po obu powierzchniach próbki. Kształt tej szczeliny powinien zostać sprawdzony po wykonaniu właściwej próby doświadczalnej na pękniętej próbce. Powierzchnie przełomu szczeliny zmęczeniowej oraz właściwego pęknięcia są całkowicie różne i przy odpowiednim oświetleniu łatwo rozróżnialne. Z tego względu można dokonać pomiaru całkowitej długości pęknięcia wstępnego. Zgodnie z normą długość szczeliny zdefiniowana jest jako $a = (a_1 + a_2 + a_3)/3$, gdzie a_2 jest długością pomierzoną w połowie grubości, a_1 i a_3 są zaś mierzone w dwóch miejscach znajdujących się w odległości $1/4$ grubości próbki od bocznych powierzchni zewnętrznych próbki. Przeprowadzona próba jest nieważna, jeżeli różnica między wartościami a_1 , a_2 , a_3 a wartością średnią a przekracza 5% lub długość szczeliny na zewnętrznych powierzchniach próbki różni się od a więcej niż 10%. Próba jest nieważna również w przypadku odchylenia płaszczyzny szczeliny zmęczeniowej od płaszczyzny symetrii karbu o kąt większy niż 10° oraz ujawnienia szczelin wielokrotnych.

Próbę wyznaczania odporności na pękanie w PSO przeprowadza się z wykorzystaniem standardowej maszyny wytrzymałościowej oraz czujnika rozwarcia pęknięcia, który jest mocowany przed badaniem na krawędziach karbu próbki. Próbę prowadzi się do zniszczenia próbki. Podczas badania należy synchronicznie rejestrować siłę rozwierania brzegów próbki oraz rozwarcie krawędzi karbu. Próbkę należy obciążać do momentu, w którym nie wytrzyma ona dalszego przyrostu siły, tzn. następuje spadek siły obciążającej przy powiększającym się rozwarciu. Podczas badań właściwych należy rejestrować i utrzymywać temperaturę próbki z dokładnością $\pm 2^\circ\text{C}$, mierząc ją za pomocą czujnika temperatury przymocowanego do powierzchni próbki w odległości nie większej niż 5 mm od szczeliny zmęczeniowej.

W materiale idealnie liniowo-sprężystym zależność między siłą i rozwarciem szczeliny powinna być liniowa aż do zniszczenia. W praktyce okazuje się jednak, że wykres tej zależności dla większości materiałów konstrukcyjnych charakteryzuje się mniejszą lub większą nieliniowością, szczególnie przy dużych obciążeniach. Powodują to dwa czynniki:

- 1) odkształcenia plastyczne;
- 2) mikrouszkodzenia osłabiające strukturę materiału.

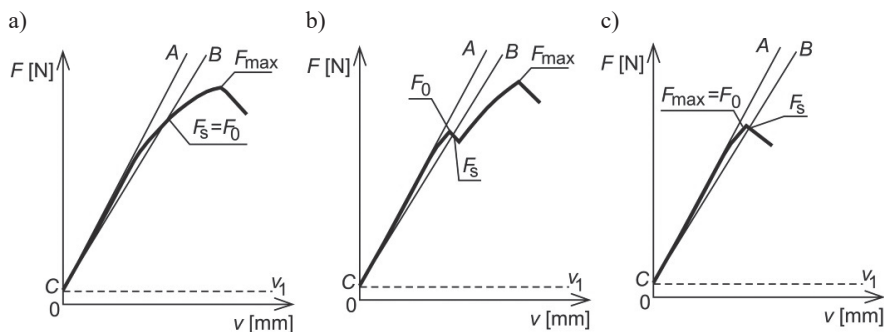
Na rys. 3.80 przedstawiono typowe wykresy uzyskiwane podczas badania rozwarcia szczeliny V :

- a) typ A opisuje nieliniowe zachowanie materiału;
- b) typ B uwzględnia tzw. efekt *pop-in*;
- c) typ C opisuje materiał mający niemal idealne liniowo-sprężyste właściwości.

Na podstawie zarejestrowanego wykresu rozwarcia szczeliny V (rys. 3.80) należy:

- 1) narysować styczną CA i wyznaczyć jej nachylenie do osi poziomej CV_1 , tzn. kąt $\angle ACV_1$;
- 2) narysować styczną CB , która jest nachylona pod kątem $0,95 \cdot \angle ACV_1$ do osi poziomej CV_1 ;

- 3) wyznaczyć wartość siły F_5 – jest to punkt przecięcia stycznej CB z wykresem;
- 4) wyznaczyć wartość siły F_Q wg stosownego typu wykresu (A, B lub C);
- 5) wyznaczyć wartość siły maksymalnej F_{max} ;
- 6) oszacować wartość współczynnika intensywności naprężeń K_Q dla siły F_Q (zgodnie ze wzorami podanymi w normie [45]).



Rys. 3.80. Zależność siły obciążającej F od rozwarcia szczeliny V , dla materiału:
a) typu A; b) typu B; c) typu C

Styczna CB odpowiada 2% umownemu przyrostowi długości szczeliny zmęczeniowej, przyjmuje się bowiem, że 5% zmiana nachylenia odpowiada zmianie podatności (sztywności) wywołanej 2% wzrostem długości szczeliny. Podejście to uwzględnia wpływ niewielkich stref plastycznych na odporność materiału na pęknięcie.

Następnie należy sprawdzić, czy są łącznie spełnione nierówności (3.108)–(3.110) oraz nierówność:

$$\left(\frac{P_{max}}{P_Q}\right) \leq 1,1 \quad (3.111)$$

wstawiając do nich zamiast K_{Ic} obliczoną wartość K_Q .

Jeżeli wszystkie podane wyżej warunki są spełnione, to należy przyjąć, że odporność materiału na pęknięcie K_{Ic} w PSO jest równa K_Q . W przypadku niespełnienia co najmniej jednej nierówności w raporcie z badań należy podać, że nie można określić prawidłowej wartości K_{Ic} według normy [45].

3.14.3. Wyznaczanie prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego

Podczas zmiennego obciążenia cyklicznego w materiale elementu konstrukcyjnego w pobliżu wewnętrznych pustek bądź wtrąceń obcych, które są lokalnymi koncentratorami naprężeń, zachodzi akumulowanie energii. Akumulacja ta prowadzi do wzrostu i łączenia się mikrodefektów, które przy pewnej liczbie cykli N_i prowadzą do pojawienia się makropęknięcia. To makropęknięcie jest nazywane szczeliną zmęczeniową. Następny etap polega na wzroście (propagacji) tej szczeliny zmęczeniowej od długości l_i do długości l_{kr} . Etap ten trwa

N_p cykli. Ostatni etap to niestabilny wzrost szczeliny, utożsamiany ze zniszczeniem zmęczeniowym. Całkowita liczba cykli obciążenia, jaką może bezpiecznie przenieść element konstrukcyjny, stanowi sumę liczby cykli do inicjacji pęknięcia N_i i liczby cykli odpowiadającej jego propagacji N_p . Liczba cykli w każdym okresie zależy od wielu czynników, a w szczególności od rodzaju materiału, przyłożonego obciążenia i geometrii szczeliny. W praktyce przyjmuje się, że dla oceny trwałości konstrukcji miarodajna jest faza propagacji szczeliny zmęczeniowej, tzn. liczba cykli N_p .

Mechanizm wzrostu szczeliny przy obciążeniu zmiennym wiąże się z lokalnym polem naprężeń w pobliżu wierzchołka szczeliny. Przy obciążeniu próbki wykonanej z materiału plastycznego w okolicach wierzchołka ostrej szczeliny zachodzą odkształcenia plastyczne spowodowane dużą koncentracją naprężeń. Uzewnętrzniają się one w fazie obciążania (wzrost obciążenia cyklicznego) poprzez powstawanie poślizgów płaszczyzn atomowych, które powodują stępienie (zaokrąglenie) wierzchołka szczeliny i powiększenie jej długości. W fazie odciążania (zmniejszanie obciążenia cyklicznego) zmniejsza się rozwarście szczeliny, a wierzchołek ponownie staje się ostry. W następnym cyklu obciążenia powyższy proces rozpoczyna się od początku. Jest on nieodwracalny, gdyż powoduje trwałe zburzenie struktury atomowej przy poślizgach plastycznych.

Proces wzrostu szczeliny zmęczeniowej wiąże się z lokalnym spiętrzeniem naprężeń i dlatego wzrost szczeliny jest kojarzony z zakresem zmian współczynnika intensywności naprężeń ΔK . Dla najczęściej występującego przypadku, gdy obciążenie jest cyklicznie zmienne, określa się zakres zmian współczynnika intensywności naprężeń ΔK :

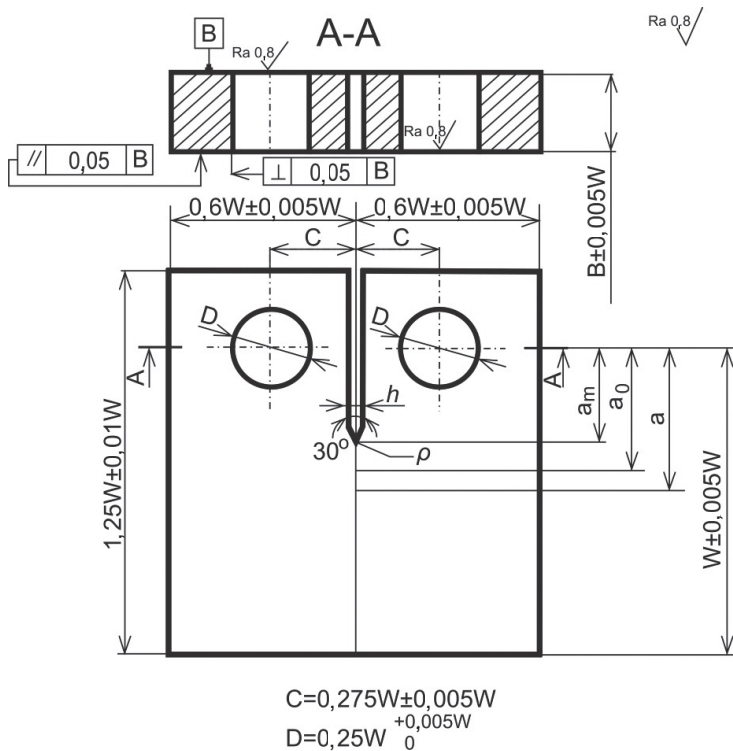
$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.112)$$

gdzie: $\Delta\sigma$ – zakres zmian naprężenia normalnego,

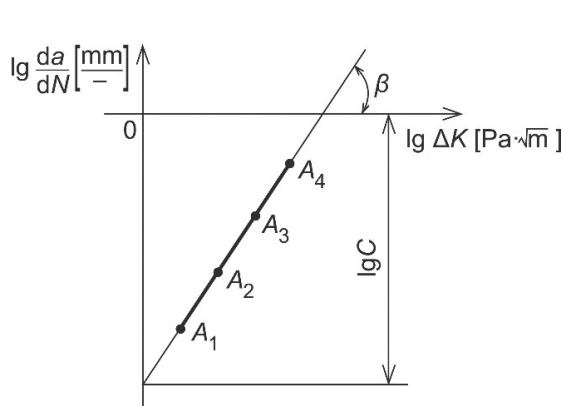
a – długość pęknięcia.

Próbka powinna być badana w takich warunkach zewnętrznych (temperatura i ciśnienie otoczenia oraz skład chemiczny środowiska), które nie wpływają na rozwój pęknięcia zmęczeniowego [33]. Rozwijanie tego pęknięcia powinno być zależne jedynie od zakresu zmian współczynnika intensywności naprężeń ΔK i współczynnika asymetrii cyklu R . Prędkość wzrostu pęknięcia zmęczeniowego $\frac{da}{dN}$ (określona za pomocą długości pęknięcia a i liczby przepracowanych cykli obciążenia N) powinna zostać oszacowana na odpowiednio przygotowanej próbce (rys. 3.81), którą należy poddać zmiennemu cyklicznemu obciążeniu siłą o niezmiennym amplitudzie.

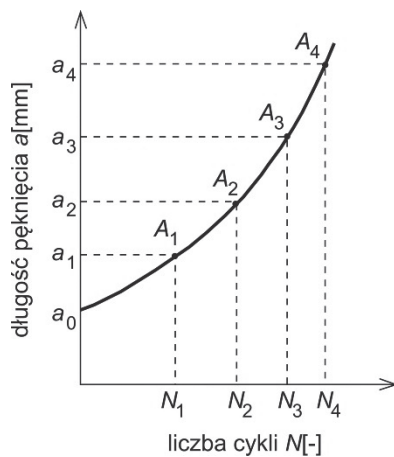
Podczas badania należy jednocześnie rejestrować długość pęknięcia a i liczbę cykli obciążenia N (rys. 3.82). Wynik badania należy przedstawić w postaci zależności prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego $\frac{da}{dN}$ od zakresu zmian współczynnika intensywności naprężeń ΔK (rys. 3.83).



Rys. 3.81. Próbkę zwartą do badania prędkości propagacji pęknięcia zmęczeniowego



Rys. 3.82. Zależność długości pęknięcia a od liczby cykli N



Rys. 3.83. Zależność prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego $\frac{da}{dN}$ od zakresu zmian współczynnika intensywności naprężeń ΔK

Do badania należy wykorzystać maszynę wytrzymałościową, która zapewni:

- 1) symetryczne obciążenie próbki względem jej karbu;
- 2) utrzymanie zakresu zmian obciążenia ΔP i maksymalnej wartości siły obciążenia P_{max} z dokładnością $\pm 2\%$.

Należy przygotować co najmniej trzy próbki, jeżeli norma przedmiotowa wyrobu badanego nie przewiduje inaczej. Właściwości mechaniczne materiału badanego wyrobu można wyznaczyć po przebadaniu trzech próbek wykonanych z tego materiału. Charakterystyczny współczynnik wymiaru W musi być dobrany tak, aby materiał próbki znajdował się w zakresie sprężystym opisanym zależnością:

$$(W - a) \geq \left(\frac{4 \cdot K_{max}}{\pi \cdot R_e} \right)^2 \quad (3.113)$$

gdzie: R_e – umowna granica plastyczności wyznaczona w temperaturze, przy której jest realizowane badanie prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego.

Minimalna wartość wymiaru W powinna wynosić: $W_{min} = 25$ mm. Grubość próbki zwartej B należy dobrać tak, aby odpowiadała ona grubości badanego elementu/wyrobu i spełniała zależność: $B \in \left[\frac{W}{20}; \frac{W}{4} \right]$.

W próbce pobranej z elementu konstrukcyjnego należy wykonać karb w takim kierunku, aby podczas badania dno karbu przenosiło obciążenia w kierunku działania maksymalnych obciążeń rzeczywistych oddziaływujących na element. Karb należy wykonać metodami obróbki skrawania.

Początkowe pęknięcie zmęczeniowe należy wykonać na maszynie wytrzymałościowej w taki sposób, aby pęknięcie to powstało z ostrza karbu mechanicznego. Długość początkowego pęknięcia zmęczeniowego a_0 powinna spełniać zależność: $(a_0 - a_m) = \max\{0,1 \cdot B, h\}$. Podczas inicjowania początkowego pęknięcia zmęczeniowego należy zagwarantować, aby współczynnik asymetrii cyklu R pozostał taki jak podczas badań właściwych. Wstępne pęknięcie zmęczeniowe może być wykonane przy dowolnej częstotliwości cykli obciążenia. Próbek zwartych nie należy stosować do badania prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego przy obciążeniach rozciągająco-ściskających.

Należy zagwarantować, aby podczas badania:

- 1) współczynnik asymetrii cyklu został zachowany;
- 2) obciążenie miało charakter sinusoidalny i działało ze stałą częstotliwością; wartość częstotliwości należy dobrać tak, aby nie zachodziło zmęczeniowe pełzanie.

Jeżeli norma przedmiotowa nie przewiduje inaczej, to należy przeprowadzić badania przy stałym zakresie zmian obciążenia ΔP , zmieniając jeden z trzech parametrów: maksymalną wartość siły obciążenia P_{max} , minimalną wartość tej siły P_{min} albo współczynnik asymetrii cyklu R .

Podczas badań właściwych należy synchronicznie rejestrować liczbę cykli obciążenia N i długość pęknięcia zmęczeniowego a . Zaleca się mierzyć tę długość w odstępach Δa nie większych niż $0,01 \cdot W$ za pomocą:

- 1) metody wizualnej (przy użyciu przenośnego mikroskopu o powiększeniu 20–50× lub lupy pomiarowej);
- 2) metody opartej na zjawiskach wykorzystujących zmiany podatności materiału związane ze zmianą długości pęknięcia;
- 3) metody ultradźwiękowej, emisji akustycznej lub oporowej.

W celu uwzględnienia krzywoliniowego kształtu frontu pęknięcia zmęczeniowego po złamaniu próbki należy zmierzyć efektywną długość pęknięcia zmęczeniowego a według metody podanej w p. 3.14.2.

Próbę należy unieważnić w przypadku, gdy:

- 1) płaszczyzna pęknięcia zmęczeniowego odchyła się od płaszczyzny symetrii karbu o kąt większy niż $\pm 10^\circ$;
- 2) różnica długości pęknięć mierzonych na obu powierzchniach próbki jest większa niż $\min\{0,025 \cdot W; 0,25 \cdot B\}$.

Wyniki badań powinny zawierać:

- 1) zakres zmian współczynnika intensywności naprężeń ΔK ;
- 2) prędkość wzrostu pęknięcia zmęczeniowego;
- 3) charakterystykę.

Zakres zmian współczynnika intensywności naprężeń ΔK należy obliczyć z zależności:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \cdot \left(2 + \frac{a}{W}\right) \cdot \left(\frac{0,886 + 4,64\frac{a}{W} - 13,32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6\left(\frac{a}{W}\right)^4}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}\right) \quad (3.114)$$

Do obliczenia prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego $\frac{da}{dN}$ można zastosować metodę siecznej, metodę różniczkowania funkcji aproksymującej (wygładzanie danych pomiarowych za pomocą metody najmniejszych kwadratów) lub inne metody aproksymacji danych pomiarowych pozwalające na uwydatnienie lokalnych zmian prędkości pęknięcia zmęczeniowego.

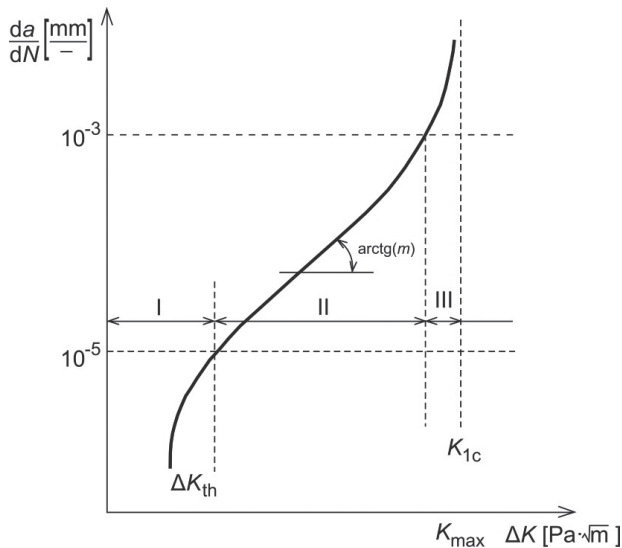
Stosując metodę siecznej, prędkość wzrostu pęknięcia zmęczeniowego $\frac{da}{dN}$ należy obliczyć z zależności: $\left(\frac{da}{dN}\right)_{\bar{a}_i} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i}$, gdzie a_i i a_{i+1} – długości pęknięcia w i -tym kroku oraz kroku następnym; N_i i N_{i+1} – liczba cykli obciążenia w i -tym kroku oraz kroku następnym.

Charakterystyka $\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$ powinna zostać przedstawiona w skali logarytmicznej (rys. 3.83): ΔK należy odłożyć na osi odciętych jako zmienną niezależną, a $\frac{da}{dN}$ – na osi rzędnych jako zmienną zależną.

W przypadku korelacji liniowej należy zastosować wzór Parisa: $\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$, gdzie C i m są współczynnikami. Współczynniki można wyznaczyć, stosując przekształcenie logarytmiczne: $lg\left(\frac{da}{dN}\right) = m \cdot lg(\Delta K) + lg(C)$, gdzie $m = tg(\beta)$.

Ogólny wykres zależności prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego od zakresu zmian współczynnika intensywności naprężeń ΔK ma postać podaną na rys. 3.84. Pęknięcie rozpoczyna się przy wartości ΔK_{th} , nazywanej progową wartością współczynnika intensywności naprężeń. Na wykresie można wyróżnić trzy etapy:

- I – etap małej prędkości (do ok. 10^{-5} mm/cykl);
- II – etap średniej prędkości (od 10^{-5} do ok. 10^{-3} mm/cykl), nazywany etapem stabilnego wzrostu;
- III – etap dużej prędkości (powyżej 10^{-3} mm/cykl), nazywany etapem niestabilnego rozwoju pęknięcia (jest kojarzony ze zniszczeniem elementu).



Rys. 3.84. Proces pęknięcia zmęczeniowego w zależności od intensywności naprężeń ΔK

3.14.4. Przygotowanie raportu z badań

Wyznaczenie odporności na pęknięcie w płaskim stanie odkształcenia

W raporcie z badań należy podać:

- 1) rodzaj badanego wyrobu i opis jego materiału;
- 2) umowną granicę plastyczności badanego materiału $R_{p0,2}$, wyznaczoną przy wydłużeniu trwałym 0,2%;
- 3) temperaturę i rodzaj badanego środowiska, w którym utworzono początkową szczelinę zmęczeniową i wykonano badania właściwe;
- 4) rodzaje badanych próbek i ich rysunki techniczne;
- 5) orientację płaszczyzny szczeliny zmęczeniowej;
- 6) wyniki obliczeń, na które składają się:

- a) uzyskane przed badaniem właściwym pomiary charakterystycznych wymiarów (grubość – B , szerokość – W oraz długość szczeliny zmęczeniowej – a),
- b) wykres siła obciążająca F – rozwarcie szczeliny V ,
- c) wartość siły F_Q i siły maksymalnej F_{max} oraz ich stosunek F_{max}/F_Q ,
- d) uzyskana po badaniu średnia długość szczeliny zmęczeniowej a ;
- e) współczynniki uzyskane podczas utworzenia początkowego pęknięcia zmęczeniowego (maksymalny współczynnik intensywności naprężeń uzyskany na etapie początkowym i maksymalny współczynnik intensywności naprężeń uzyskany na etapie końcowym utworzenia pęknięcia zmęczeniowego, gdy rozwój szczeliny był równy 2,5% początkowej długości tej szczeliny),
- f) wnioski dotyczące spełnienia trzech warunków:
 - $(F_{max}/F_Q \leq 1,10)$
 - $(W - a) \geq 2,5 \cdot (K_{Ic}/R_{p0,2})^2$
 - $B \geq 2,5 \cdot (K_{Ic}/R_{p0,2})^2$
- g) wyznaczona odporność na pęknięcie w płaskim stanie naprężenia K_{Ic} ,
- h) wnioski stwierdzające, czy podana odporność na pęknięcie w płaskim stanie naprężenia K_{Ic} została uzyskana w prawidłowy sposób.

Wyznaczanie prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego

W raporcie z badań należy podać:

- 1) rodzaje badanych próbek i ich rysunki techniczne;
- 2) wymiary charakterystyczne badanych próbek (grubość – B , szerokość – W , długość wstępnego pęknięcia zmęczeniowego – a_0);
- 3) opis elementu konstrukcyjnego lub rodzaj półwyrobu, z którego pobrano próbki, warunki pracy elementu/półwyrobu, miejsce pobierania próbek do badań i ich orientację w badanym elemencie/półwyrobie;
- 4) skład chemiczny badanego materiału oraz stan jego struktury i właściwości mechaniczne;
- 5) opis warunków badania:
 - a) warunki obciążenia (ΔP , P_{min} , P_{max} , R , kształt i częstotliwość zmian obciążenia),
 - b) warunki otoczenia (temperatura, ciśnienie, wilgotność powietrza i skład chemiczny środowiska),
 - c) metoda stosowana do pomiaru długości pęknięcia zmęczeniowego a ,
 - d) metoda stosowana do obliczenia $\frac{da}{dN}$,
 - e) sposób określenia poprawki na krzywiznę frontu pęknięcia zmęczeniowego i jej wartość,
 - f) dokładność pomiarów długości pęknięcia zmęczeniowego a i liczby cykli obciążenia N ,
 - g) wyniki synchronicznych pomiarów długości pęknięcia zmęczeniowego a i liczby cykli obciążenia N uzyskane w kolejnych krokach pomiarowych,

- h) wykres i/lub zależność $\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$ dla poszczególnych warunków badań,
- i) wyniki analizy statystycznej (współczynnik korelacji, równanie regresji, przedział ufności oszacowany na poziomie 95%),
- j) mikroskopowy opis przelomów zmęczeniowych, uwzględniający płaską strefę przelomu (od końca wstępnego pęknięcia zmęczeniowego do miejsca wystąpienia cięć jedno- lub dwustronnych).

3.15. Próba udarowa spadającym ciężarem

3.15.1. Cel próby

Celem próby jest zapoznanie się z metodą prowadzenia próby udarowej spadającym ciężarem (DWTT – *drop weight tear test*). Próba ta jest realizowana według wytycznych normy PN-EN 10274:2002 [38]. Próba udarowa pozwala na oszacowanie:

- 1) udziału powierzchni przelomu ciągliwego i powierzchni przelomu kruchego próbki wykonanej ze stali ferrytycznej z następczym określeniem temperatury przejścia w stan kruchy (FATT) lub podanie udziału przelomu ciągliwego w określonej temperaturze;
- 2) energii zaabsorbowanej do łamania próbki metalowej w określonej temperaturze (zazwyczaj dla materiałów innych niż stal ferrytyczna).

3.15.2. Wykonanie próby

Temperatura przejścia w stan kruchy (FATT) jest to temperatura, przy której uzyskuje się wymagany udział procentowy powierzchni przelomu ciągliwego. Oznaczenie: FATT (procentowy udział przelomu ciągliwego) = temperatura w skali Celsjusza.

Powierzchnia przelomu ciągliwego jest to pole powierzchni przelomu próbki, które ma charakter ciągliwy (tzn. widoczna powierzchnia ma szare jedwabisto-matowe zabarwienie).

Powierzchnia przelomu kruchego jest to pole powierzchni przelomu próbki, które ma charakter kruchy (widoczna powierzchnia ma błyszczące krystaliczne zabarwienie).

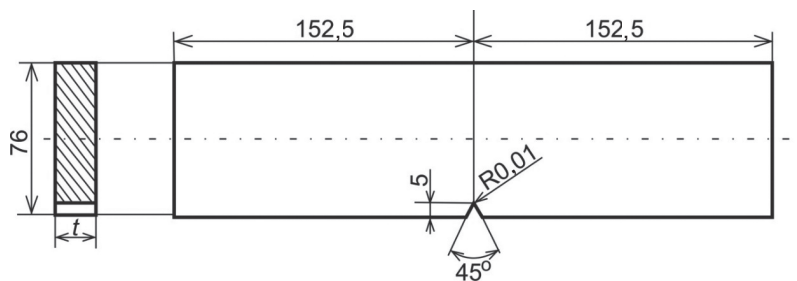
Stal ferrytyczna jest to stal, w której struktura ferrytyczna jest stała w całym zakresie temperatur zastosowania.

Próbki do badań należy pobrać z:

- 1) blach przeznaczonych do produkcji rur;
- 2) rur o średnicy zewnętrznej większej niż 300 mm i grubości ścianki większej niż 6 mm.

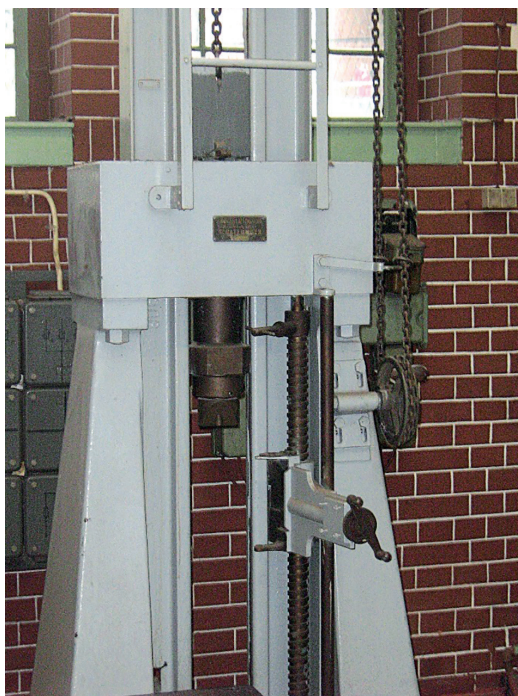
Miejsce i kierunki pobierania próbek powinny być zgodne z wytycznymi podanymi w normie przedmiotowej badanego materiału. Dopuszczalne jest wycinanie próbek na „zimno” (na obrabiarkach albo nożycami) lub palnikiem gazowym. Należy przy tym zagwarantować, aby strefy materiału zmienionego (zgniecionego lub przegrzanego) zostały usunięte z próbki za pomocą obróbki mechanicznej.

Grubość próbki t (rys. 3.85) powinna być równa grubości elementu badanego. Próbka do badań pobrana z rury może być zupełnie wyprostowana lub może zawierać pierwotną krzywiznę w części środkowej na długości równej 50 mm. Próbka powinna zawierać karb w kształcie litery V, który należy wytłoczyć na zimno za pomocą bardzo twardego ostrza (nie dopuszczalne jest nacinanie karbu). Karb powinien być starannie wykonany i posiadać promień zaokrąglenia równy $0,02 \pm 0,01$ mm (karb jest inicjatorem pęknięcia).



Rys. 3.85. Próbka do badań DWTT

Próbie udarowa spadającym ciężarem przeprowadza się na młocie kafarowym (rys. 3.86).



Rys. 3.86. Młot kafarowy

Wymiary oprzyrządowania młota powinny być zgodne z wytycznymi normy [38]. Nóż młota kafarowego powinien być odpowiednio zaokrąglony. Podczas badania powinien on uderzyć w środek linii łączącej kowadła (podparcie) rozstawione w odległości 254 mm. Prędkość młota (spadającego ciężaru) w chwili uderzenia powinna się mieścić w przedziale od 5 do 10 m/s.

W celu prawidłowej propagacji pęknięcia próbki łamanej młot spadowy powinien posiadać minimalną energię uderzenia E_{REQ} , którą należy oszacować z zależności:

$$E_{REQ} = 5,6 \cdot KV \cdot \frac{A_{DWTT}}{A_{KV}} \quad (3.115)$$

gdzie: KV – energia łamania próbki z karbem V na młocie Charpy’ego;

A_{DWTT} – pole powierzchni przełomu w próbie udarowej spadającym ciężarem (DWTT);

A_{KV} – pole powierzchni przełomu próbki z karbem V na młocie Charpy’ego.

Badanie należy przeprowadzić na próbkach, które posiadają odpowiednią temperaturę, przy czym temperatura powierzchni każdej próbki przed uderzeniem powinna się mieścić w granicach $\pm 1^\circ\text{C}$ temperatury zadanej. Z tego względu przed badaniem każda próbka jest doprowadzana do odpowiedniej temperatury poprzez zastosowanie określonego ośrodka chłodząco-grzewczego. Dopuszczalne jest wykorzystanie cyrkulacji tego ośrodka w celu uzyskania równomiernego rozkładu temperatur w całej objętości próbki.

Po doprowadzeniu próbki do odpowiedniej temperatury jest ona umieszczana na kowadłach młota kafarowego w taki sposób, że:

- a) karb znajduje się na środku linii łączącej kowadła;
- b) karb znajduje się po przeciwnej stronie powierzchni, w którą uderzy spadający ciężar;
- c) próbka jest zabezpieczona przed obracaniem się podczas uderzenia.

Po umieszczeniu próbki na kowadłach młota kafarowego należy ją niezwłocznie złamać jednym uderzeniem młota.

W celu oszacowania udziałów powierzchni przełomu kruchego lub ciągliwego należy zastosować metodę wizualną. Zalecane jest użycie planimetru (do pomiaru udziałów na zdjęciu powierzchni przekroju) lub zestawu płytek wzorcowych.

Podczas szacowania wyniku dla próbek ze stali ferrytycznych należy uwzględnić następujące wymogi:

- a) procentowy udział powierzchni przełomu ciągliwego dla próbki o grubości nie większej niż 19 mm powinien być określony na powierzchni znajdującej się w odległości równej grubości próbki od dna karbu i od przeciwnej strony karbu;
- b) procentowy udział powierzchni przełomu ciągliwego dla próbki o grubości większej niż 19 mm należy określić na powierzchni znajdującej się w odległości równej 19 mm od dna karbu i od przeciwnej strony karbu;
- c) powierzchnie przełomu powinny zostać oszacowane podczas obserwacji pod kątem prostym do tych powierzchni;

- d) jeżeli powierzchnia pęknięcia wykazuje obszary w kształcie grota strzałki, to obszary te należy zaliczyć do przelomu kruchego;
- e) w przypadku występowania nieciągłych obszarów ciągłych i kruchych należy każdy z tych obszarów zsumować;
- f) obszary (ciągłe lub kruche) zawierające pęknięcia należy pominąć.

Należy zwrócić uwagę, że przy złamaniu próbek ze stali ferrytycznych o grubości większej niż 19 mm może wystąpić nadmierne odkształcenie plastyczne w punkcie uderzenia. Z tego względu zaleca się:

- 1) zmniejszenie grubości próbki do 19 mm;
- 2) obniżenie temperatury próbki (załącznik A, norma [38]).

W przypadku badania próbek z materiałów innych niż stal ferrytyczna wynik pomiaru szacuje się zazwyczaj jako energię zaabsorbowaną na łamanie, stosując odpowiednio przygotowane układy pomiarowe.

W przypadku badania próbek posiadających zakrzywienie w części środkowej wynik należy oszacować jedynie poprzez wizualne badanie części zakrzywionej, z pominięciem przelomu uzyskanego na części wyprostowanej. Podejście to jest uwarunkowane tym, że część wyprostowana próbki dostarcza mniej wiarygodnych wyników, będących skutkiem umocnienia materiału zachodzącego podczas prostowania.

Na podstawie wyników badań można sporządzić wykres DT (*drop test*), który pokazuje, w jaki sposób energia łamania zależy od temperatury (patrz ćwiczenie 3.4: *Badanie udarowości metali*). Wykres ten pozwala na określenie zakresu niebezpiecznych temperatur pracy oraz oszacowanie dla niektórych materiałów temperatury kruchości (jest to temperatura, przy której materiał przechodzi w stan kruchy) [4]. Należy przy tym również pamiętać, że przejście materiału w stan kruchy zależy od następujących czynników: wieloosiowego stanu naprężeń (obecność karbu), obciążenia dynamicznego, niskiej temperatury oraz metalurgicznego stanu materiału.

3.15.3. Przygotowanie raportu z badań

W raporcie z badań należy podać:

- 1) numer normy [38];
- 2) wymiary rury lub blachy, z której pobrano próbki;
- 3) identyfikację próbek do badań (specyfikacja materiału, numer wytopu, grubość próbki);
- 4) informacje dotyczące prostowania próbki przed badaniem;
- 5) energię młota katarowego lub masę i wysokość spadania młota;
- 6) wyniki badania (zależność przelomu ciągliwego od temperatury próbki lub temperaturę przejścia próbki w stan kruchy albo energię zaabsorbowaną podczas łamania).

3.16. Statyczna próba rozciągania metali w podwyższonej temperaturze. Zjawisko pełzania

3.16.1. Cel próby

Cele próby obejmują:

- 1) zapoznanie się z metodą realizacji statycznej próby rozciągania w podwyższonej temperaturze;
- 2) porównanie wyników uzyskanych w statycznej próbie rozciągania w podwyższonej temperaturze i w temperaturze otoczenia;
- 3) zapoznanie się ze zjawiskiem pełzania metali i metodami jego badania.

3.16.2. Statyczna próba rozciągania w podwyższonej temperaturze

Statyczną próbę rozciągania w podwyższonej temperaturze przeprowadza się według wytycznych podanych w normie PN-EN ISO 6892-2:2011 [59]. Próba ta polega na statycznym rozciąganiu próbki, której część pomiarowa jest nagrzana do wymaganej temperatury, oraz wyznaczeniu właściwości mechanicznych (wytrzymałościowych i technologicznych) materiału badanej próbki.

Do badania można zastosować próbki obrobione mechanicznie (proporcjonalne lub nieproporcjonalne) oraz gotowe elementy konstrukcyjne (np. pręty, druty). Próbki należy przygotować według wytycznych podanych w normie. Promień przejścia między częścią uchwytną a częścią pomiarową powinien być zgodny z wymaganiami wskazanymi w normie. Część uchwytna próbki powinna być dopasowana do uchwytów. Przed badaniem długość pomiarową próbki należy oznakować tak, aby znaki pomiarowe na próbce nie działały jak karby.

Próbka powinna zostać zamocowana w uchwytach w sposób zapewniający jednoosiowe rozciąganie jej części pomiarowej. Wymiary próbki powinny być dostosowane do urządzenia grzewczego (w ćwiczeniu wykorzystuje się piec oporowy). Należy zagwarantować, aby podczas badania w piecu znajdowała się wyłącznie część robocza próbki.

Po zamontowaniu próbki w urządzeniu grzewczym należy to urządzenie włączyć. Statyczna próba rozciągania w podwyższonej temperaturze jest przeprowadzana po upływie 10 min od momentu ustalenia stałej temperatury w części roboczej próbki. Próbka powinna zostać zamontowana w sposób pozwalający na nieskrępowane wydłużenie próbki spowodowane jej nagrzewaniem. Jeżeli mierzy się długość części roboczej próbki (za pomocą ekstensometru), to po osiągnięciu zadanej temperatury badania próbę rozciągania należy rozpocząć dopiero wtedy, gdy długość próbki się ustabilizuje.

Temperatura badania jest przedziałem, w którym powinna się zawierać temperatura mierzona na części roboczej próbki: $[T - \Delta T; T + \Delta T]$, gdzie T – wartość średnia temperatury, ΔT – dopuszczalny uchyb temperatury. W przypadku nagrzania do 600°C uchyb temperatu-

ry ΔT powinien być nie większy niż 3°C . Temperatura badania powinna zostać utrzymana w podanym zakresie do osiągnięcia przez próbkę granicy plastyczności.

Temperaturę próbki powinno się mierzyć w trzech miejscach na części roboczej próbki. Czujniki temperatury powinny się znajdować w jednakowych odstępach. Aktualna temperatura próbki jest wartością średnią trzech temperatur pomierzonych przez trzy czujniki temperatury w tej samej chwili.

Jako czujnik temperatury często wykorzystuje się termoparę. Jest ona mocowana do części roboczej próbki w sposób, który zapewnia właściwy cieplny kontakt z powierzchnią próbki i unikanie bezpośredniego promieniowania ścian pieca.

W przypadku zastosowania ekstensometru próbki nie należy znakować. Ekstensometr należy zamontować w środku części pomiarowej przed zamontowaniem urządzenia grzewczego. Po ustaleniu temperatury badania i przed statycznym rozciąganiem próbki ekstensometr trzeba wyzerować.

Podczas próby rozciągania siła powinna zostać przyłożona osiowo bez wstrząsów i uderzeń, aby zminimalizować działanie momentów skręcających i momentów gnących na część roboczą próbki. Prędkość odkształcenia lub prędkość przyrostu naprężenia próbki zależy od okresu badania i materiału próbki. Przy tym należy zadbać, aby prędkość ta była zgodna z wytycznymi normy w okresie sprężystym, okresie płynięcia i podczas umocnienia.

Po przeprowadzeniu próby wyznacza się właściwości mechaniczne materiału próbki badanej (por. p. 3.1 *Statyczna próba rozciągania metali*).

Wydłużenia procentowe po rozerwaniu można porównać jedynie wtedy, gdy:

- 1) wskaźnik proporcjonalności k jest taki sam;
- 2) próbki mają taką samą długość pomiarową, kształt i powierzchnię przekroju poprzecznego.

3.16.3. Zjawisko pełzania metali

Zjawisko pełzania metali zachodzi w elemencie, który w podwyższonej i stałej temperaturze przenosi stałe obciążenie [8]. Polega ono na trwałym wydłużeniu elementu w miarę upływu czasu. W temperaturze pokojowej pełzanie przejawia się w tworzywach sztucznych i stopach lekkich. W temperaturze podwyższonej zjawisko to zachodzi także w stalach (rurach, wirnikach, łopatkach turbin itp.).

W temperaturze otoczenia naprężenia wywołujące pełzanie w elementach stalowych są większe od wartości granicy plastyczności R_e [20]. Ze wzrostem temperatury obniża się granica plastyczności, obniżają się także naprężenia wywołujące pełzanie. W temperaturze powyżej 300°C granica pełzania dla stali konstrukcyjnej leży poniżej jej granicy plastyczności. W praktyce oznacza to, że przy tych temperaturach pracy granica pełzania jest dopuszczalnym naprężeniem elementu badanego.

Temperatura pełzania zależy od temperatury topnienia T_f . Przyjęto, że dla metali temperatura pełzania jest równa od $0,3 \cdot T_f$ do $0,5 \cdot T_f$. W praktyce oznacza to, że w elementach maszyny przy temperaturach wyższych od podanego zakresu może zachodzić proces pełzania, który ma duży wpływ na trwałość elementów tej maszyny. W ogólnym przypadku wpływ

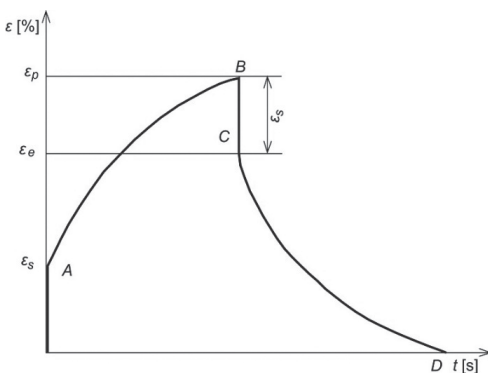
temperatury na proces pełzania określa się za pomocą temperatury homologicznej, która jest stosunkiem absolutnej temperatury badania T do absolutnej temperatury topnienia T_f .

Szybkość pełzania materiału obciążonego w wysokiej temperaturze zależy od:

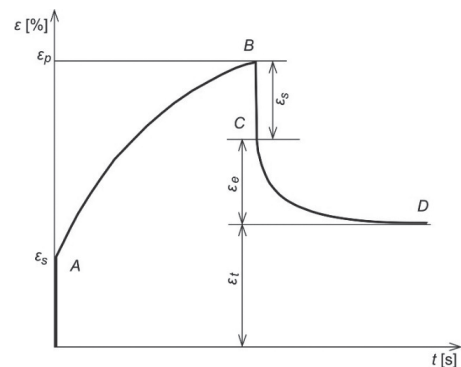
- 1) dyfuzyjnej migracji atomów;
- 2) przemieszczenia dyslokacji;
- 3) poślizgu po granicach ziaren;
- 4) zdrowienia, rekrytalizacji i rozrostu ziaren;
- 5) wzrostu cząstek fazy umacniającej (koagulacji).

Przy jednoosiowym obciążeniu, którego wartość nie przekracza granicy sprężystości materiału przy danej temperaturze, proces pełzania może zachodzić w dwóch postaciach:

- 1) pełzanie sprężyste (rys. 3.87) (po obciążeniu w punkcie B odkształcenia się powoli zmniejszają i po pewnym czasie znikają całkowicie);
- 2) pełzanie plastyczne (rys. 3.88) (po obciążeniu w punkcie B po upływie czasu pozostają odkształcenia trwałe ε_t).



Rys. 3.87. Pełzanie sprężyste



Rys. 3.88. Pełzanie plastyczne

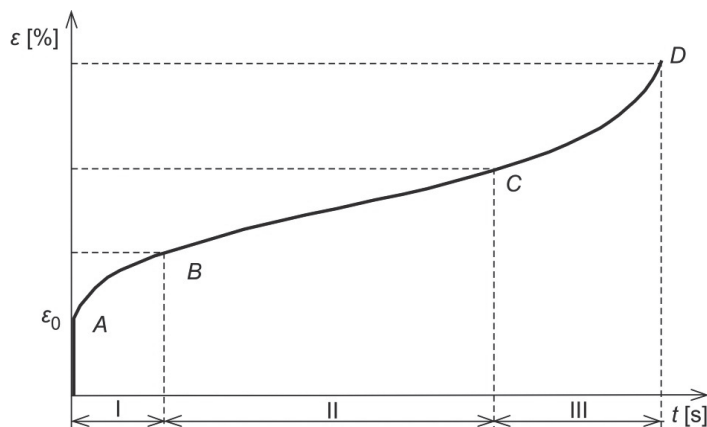
Na powyższych rysunkach poszczególne symbole oznaczają: ε_s – odkształcenie sprężyste (na odcinku OA odkształcenie ε_s jest nazywane odkształceniem natychmiastowym, na BC zaś – odkształceniem nawrotu sprężystego), ε_p – odkształcenie pełzania (odcinek AB), ε_e – odkształcenie nawrotu niesprężystego (odcinek CD).

Należy zwrócić uwagę, że pełzanie plastyczne z reguły zachodzi w metalach. Z kolei w tworzywach sztucznych i polimerach może zachodzić zarówno pełzanie sprężyste, jak i plastyczne (typ pełzania zależy od budowy materiału).

W celu określenia warunków bezpiecznej pracy maszyny, której elementy mogą ulegać procesom pełzania, należy te elementy przebadać i wyznaczyć następujące przebiegi czasowe w temperaturze pracy maszyny: odkształcenia pełzania $\varepsilon_p(t)$, zmiany odkształcenia pełzania $\dot{\varepsilon}_p(t)$, naprężenia $\sigma(t)$. Temperatura ma duży wpływ na zachowanie materiału, wpływa bowiem na strukturę materiału. Z tego względu badanie pełzania z reguły odbywa się przy ustalonej temperaturze. W większości przypadków opisanie procesu pełzania w elementach znaj-

dujących się w stanach wieloosiowych jest problemem trudnym do rozwiązania. W związku z tym stosuje się metodę wyznaczenia przebiegów w stanach jednoosiowych, która jest łatwiejsza do realizacji i weryfikacji doświadczalnej.

W celu zbadania zjawiska pełzania przeprowadza się próbę pełzania. Próba ta polega na mierzeniu w czasie wydłużenia próbki, która jest obciążona w sposób stały i znajduje się w podwyższonej stałej temperaturze. Wynikiem próby pełzania jest krzywa pełzania, która przedstawia zmianę odkształcenia całkowitego próbki ε od czasu t (rys. 3.89).



Rys. 3.89. Wykres pełzania i podział pełzania na okresy

Na krzywej pełzania można wyróżnić kilka etapów:

- etap odkształcenia natychmiastowego ε_0 (odcinek OA), którego punkt końcowy A jest początkiem procesu pełzania; w przypadku, gdy naprężenie w materiale nie przekracza granicy sprężystości w danej temperaturze, w materiale zachodzi pełzanie sprężyste; w przypadku, gdy naprężenie w materiale przekroczy granicę sprężystości w danej temperaturze, w materiale zachodzi pełzanie plastyczne;
- etap I jest okresem pełzania nieustalonego (odcinek AB), w okresie tym prędkość pełzania się zmniejsza;
- etap II jest okresem pełzania ustalonego (odcinek BC), w okresie tym prędkość pełzania jest stała;
- etap III jest okresem pełzania przyspieszonego (odcinek CD), w okresie tym prędkość pełzania jest przyspieszona i prowadzi do złamania próbki.

W przypadku materiału metalowego pełzanie nieustalone jest wynikiem poślizgu wewnątrz ziaren, pełzanie ustalone zaś – poślizgu po granicach ziaren [2]. Odkształcenie pełzania zależy od czasu, natomiast odkształcenie plastyczne jest niezależne od czasu.

Pominięcie występowania w obliczanej konstrukcji odkształcenia natychmiastowego (niepochodzącego od pełzania) doprowadza do zniszczenia lub nieprawidłowej pracy tej kon-

strukcji. Podobnie, wejście materiału elementu konstrukcji w zakres pełzania przyspieszonego jest traktowane jako zniszczenie tego elementu.

Ze względu na temperaturę pełzanie można podzielić na:

- 1) pełzanie w niskich temperaturach (prędkość odkształcenia jest zmniejszona wskutek umocnienia materiału spowodowanego powstaniem odkształceń trwałych);
- 2) pełzanie w wysokich temperaturach (prędkość odkształcenia jest stała, ponieważ nie następuje umocnienie materiału).

Pełzanie w wysokich temperaturach ma dwie postacie:

- 1) pełzanie dyslokacyjne (duże naprężenie jest czynnikiem powodującym wspinanie dyslokacji; pełzanie stanowi skutek poślizgu, dyslokacji spowodowanej dyfuzyjnym wspinaniem dyslokacji);
- 2) pełzanie dyfuzyjne (pełzanie jest wywołane przez mniejsze naprężenia, które przejawiają się w postaci wydłużenia się naprężonych ziaren materiału wskutek ruchu wakansów wewnątrz tych ziaren).

W przypadku metali polikrystalicznych przy zniszczeniu próbki może powstać złom śródkrystaliczny lub międzykrystaliczny. Przy złomie śródkrystalicznym tworzy się lokalne przewężenie (szyjka), a złom ma charakter plastyczny. Przy złomie międzykrystalicznym nie dochodzi do lokalnego przewężenia (wewnątrz materiału występują liczne pęknięcia), a złom ma charakter kruchy.

Złom plastyczny występuje zazwyczaj w niskich temperaturach i przy dużych prędkościach odkształcenia. Ten rodzaj złomu występuje także przy relaksacji naprężeń na granicach ziaren (por. p. 3.4).

Złom kruchy występuje zazwyczaj w wysokich temperaturach i przy małych prędkościach odkształcenia.

W temperaturach pośrednich zniszczenie następuje zazwyczaj bez lokalnego przewężenia i ma charakter mieszany: w strefie zewnętrznej przelomu występuje złom plastyczny, w strefie wewnętrznej zaś – złom kruchy. Natomiast podwyższenie temperatury lub wydłużenie czasu przebywania próbki w stanie nagrzanym zwiększa kruchość materiału.

3.16.4. Próba pełzania metali

Próba pełzania polega na długotrwałym obciążeniu próbki stałym w czasie naprężeniem jednoosiowym rozciągającym przy niezmiennych warunkach temperaturowych [18]. Próba jest przeprowadzana według wytycznych normy PN-EN ISO 204:2009 [48] w postaci:

- 1) próby nieprzerywanej (do określenia wydłużenia pełzania lub czasu pełzania);
- 2) próby przerywanej (do określenia trwałego wydłużenia w zadanym przedziale czasowym).

Do badania są wykorzystywane próbki proporcjonalne przy współczynniku proporcjonalności $k \geq 5$. Próbki te powinny posiadać odpowiedni promień przejścia między częścią ro-

boczą a częścią uchwytną. Próbkę do badań nie powinna posiadać odkształceń reszkowych ani wad powierzchniowych powstałych podczas obróbki mechanicznej.

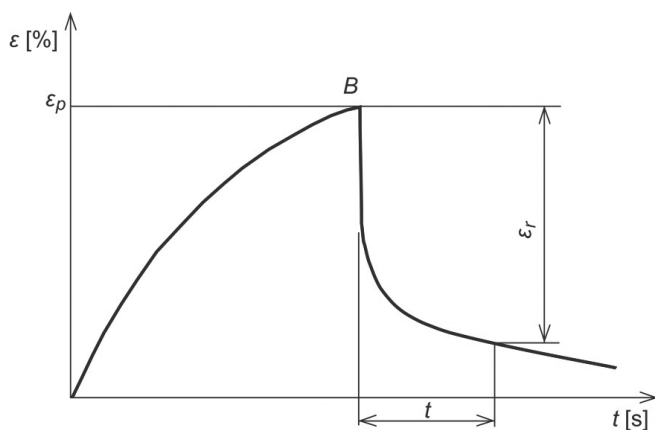
Po zamontowaniu próbki w uchwytach i nagrzaniu jej do wyznaczonej temperatury próbkę tę należy zostawić bez obciążenia w określonym przedziale czasu, który zależy od rodzaju badania (próba przerywana i próba nieprzerywana). Dopiero po upływie tego czasu próbkę należy obciążyć i przeprowadzić badanie.

Próbę pełzania wykonuje się w celu określenia:

- trwałości próbki t_u (czas potrzebny do zniszczenia próbki);
- procentowego wydłużenia pełzania: $A_{fa/t}^b = \frac{\Delta l_{rt}}{l_{r0}} \cdot 100$ (stosunek przyrostu długości pomiarowej Δl_{rt} w przedziale czasu t przy temperaturze b i początkowym naprężeniu a do początkowej długości pomiarowej l_{r0});
- procentowego wydłużenia pełzania po zerwaniu: $A_{ua}^b = \frac{l_{ru} - l_{r0}}{l_{r0}} \cdot 100$ (stosunek różnicy długości pomiarowej Δl_{ru} po zerwaniu i początkowej długości pomiarowej Δl_{r0} przy temperaturze b i początkowym naprężeniu a do początkowej długości pomiarowej Δl_{r0});
- przewężenia procentowego po rozerwaniu $Z_{ua}^b = \frac{S_o - S_u}{S_o} \cdot 100$ (stosunek różnicy początkowego pola powierzchni próbki S_o i pola powierzchni próbki po zerwaniu S_u przy temperaturze b i początkowym naprężeniu a do początkowego pola powierzchni próbki S_o).

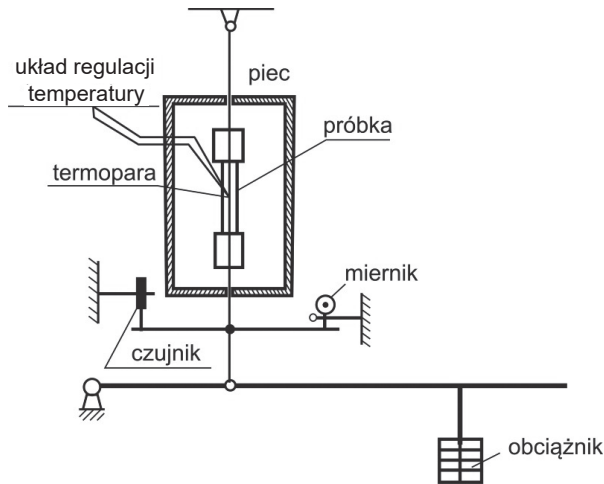
Dodatkowo z próby pełzania szacuje się wielkości nienormowane:

- wytrzymałość trwała na rozciąganie R_∞ (największe naprężenie, które nie spowoduje rozerwania próbki po dowolnie długim czasie obciążenia);
- nawrót ε_r (stosunek zmniejszenia wydłużenia względnego do początkowej długości pomiarowej po upływie czasu t odliczanym od chwili odciążenia próbki) (rys. 3.90).



Rys. 3.90. Określenie nawrotu

Próbkę pełzania przeprowadza się na pełzarku (rys. 3.91). Próbka zostaje umieszczona w piecu i obciążona obciążnikami poprzez dźwignię. Wydłużenie próbki może być mierzone za pomocą czujnika (np. indukcyjnego), którego sygnał pomiarowy jest przekazywany do miernika lub czujnika zegarowego. Temperatura próbki jest mierzona za pomocą termopary, której sygnał jest przekazywany do układu sterowania temperaturą.



Rys. 3.91. Schemat pełzarki

Pełzarka powinna zapewnić:

- 1) obciążenie próbki w sposób jednoosiowy, przy minimalizacji wpływu momentów gnących i skręcających;
- 2) obciążenie próbki bez wstrząsów;
- 3) utrzymanie stałego obciążenia i zadanej temperatury w zadanym przedziale czasowym lub do zerwania próbki;
- 4) pomiar czujnikiem (ekstensometrem) o pierwszej klasie dokładności;
- 5) nieprzeniesienie na próbkę zewnętrznych drgań i uderzeń.

Próbka do próby pełzania powinna mieć część roboczą o przekroju kołowym, kwadratowym lub prostokątnym, a część uchwytną dopasowaną do uchwytów maszyny.

3.16.5. Uwagi końcowe

Przeprowadzenie próby pełzania na ściskanie jest obarczone licznymi komplikacjami, które powstają wskutek działania sił tarcia na powierzchniach styku próbki z płytami doczołowymi. Siły te wywołują beczkowatość i zaburzają przebieg jednoosiowego stanu naprężenia. Stosowanie smaru do zmniejszenia sił tarcia jest możliwe tylko przy niskich temperaturach, gdyż przy temperaturach wysokich smar się wypala. Nieliczne badania dotyczące próby pełzania przy rozciąganiu i ściskaniu metali świadczą o pokrywaniu się krzywych pełzania.

Istnieje również pełzanie dynamiczne, które zachodzi w warunkach obciążeń zmiennych i przejawia się jako zanikanie granicy zmęczenia w podwyższonej temperaturze.

Należy też wspomnieć, że w materiałach konstrukcyjnych może zachodzić proces relaksacji, który można potraktować jako zjawisko odwrotne do zjawiska pełzania [39]. Relaksacja jest procesem zachodzącym w elemencie poddanym działaniu obciążeń długotrwałych i polega na obniżeniu naprężeń w elemencie przy zachowaniu stałej wartości odkształcenia całkowitego. Obniżenie naprężeń stanowi wynik zmniejszenia udziału odkształceń sprężystych. Przykładem procesu relaksacji jest zmniejszenie się naprężeń w śrubach łączących kolnierze rurociągów (nazywane „obluzowaniem”).

3.16.6. Przygotowanie raportu z badań

Statyczna próba rozciągania w podwyższonej temperaturze

W raporcie z badań należy podać:

- 1) tytuł badania i numer normy [59];
- 2) dane dotyczące maszyny wytrzymałościowej (typ, zakres pomiarowy i dokładność wskazań układu pomiarowego siły);
- 3) oznaczenia identyfikujące próbki;
- 4) materiał, z jakiego wykonano próbki;
- 5) położenie próbek oraz kierunki ich pobrania;
- 6) kształt i wymiary próbek przed badaniem;
- 7) wymiary próbek po badaniu;
- 8) temperaturę badania;
- 9) wyniki próby (charakterystyki rozciągania statycznego w podwyższonej temperaturze, oszacowane wartości własności plastycznych w [%] oraz wytrzymałościowych w [MPa], zaokrąglone do liczby całkowitej);
- 10) opis wad materiałowych (jeżeli takie występują).

Próba pełzania metali

W raporcie z badań należy podać:

- 1) rodzaj próby pełzania wykorzystanej w badaniu oraz numer normy [48];
- 2) dane dotyczące maszyny wytrzymałościowej (typ, zakres pomiarowy i dokładność wskazań układu pomiarowego siły);
- 3) oznaczenia identyfikujące próbki;
- 4) materiał, z jakiego wykonano próbki;
- 5) położenie próbek oraz kierunki ich pobrania;
- 6) kształt i wymiary próbek przed badaniem;
- 7) wymiary próbek po badaniu;
- 8) temperaturę badania;

- 9) wyniki próby pełzania (charakterystyki, trwałość próbki, procentowe wydłużenie pełzania, procentowe wydłużenie po zerwaniu pełzania, przewężenie procentowe po rozerwaniu);
- 10) opis wad materiałowych (jeżeli takie występują).

4. Literatura

- 1) Bachmacz W., Werner K.: Wytrzymałość materiałów: studium doświadczalne. Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2002.
- 2) Blicharski M.: Wstęp do inżynierii materiałowej. WNT, Warszawa 2001.
- 3) Boruszak A., Sygulski R., Wrześniowski K.: Wytrzymałość materiałów: doświadczalne metody badań. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1984.
- 4) Butnicki S.: Spawalność i kruchość stali. WNT, Warszawa 1991.
- 5) Cywiński M., Grzyb R., Jędrzejowski S., Kajzer S., Kozik R., Oczkowicz T., Rabus J., Spiess W., Tyma A.: Ćwiczenia laboratoryjne z obróbki plastycznej metali. Skrypty Uczelniane, 1666. Politechnika Śląska, Gliwice 1993.
- 6) Ćwiczenia laboratoryjne z wytrzymałości materiałów. Banasiak M. (red.). PWN, Warszawa 2000.
- 7) Ćwiczenia laboratoryjne z wytrzymałości materiałów. Mazurkiewicz S. (red.). Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1999.
- 8) Dietrich J. i in.: Podstawy konstrukcji maszyn. Tom 1. PWN, Warszawa 1999.
- 9) Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń. Orłowski Z. (red.). PWN, Warszawa 1977.
- 10) Dyląg Z., Orłowski Z.: Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów. WNT, Warszawa 1962.
- 11) Erbel S., Kuczyński K., Olejnik L.: Technologia obróbki plastycznej: laboratorium. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- 12) German J.: Wprowadzenie do mechaniki pękania. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2018.
- 13) Golis B., Pilarczyk J.W., Muskalski Z.J., Błażejowski Z.: Liny stalowe. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2006.
- 14) Gosowski B., Kubica E.: Badania laboratoryjne z konstrukcji metalowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
- 15) Jastrzębski P., Mutermilch J., Orłowski W.: Wytrzymałość materiałów. Część 1. Arkady, Warszawa 1985.
- 16) Katarzyński S., Kocańda S., Zakrzewski M.: Badania właściwości mechanicznych metali. WNT, Warszawa 1967.

- 17) Klimpel A.: Kontrola i zapewnienie jakości w spawalnictwie. Tom 1. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- 18) Laboratorium wytrzymałości materiałów. Rechul Z., Ziaja J., Żuchowski R. (red.). Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
- 19) Łączkowski R.: Wytrzymałość materiałów. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1996.
- 20) Malinin N.N., Rżysko J.: Mechanika materiałów. PWN, Warszawa 1981.
- 21) Marciniak M., Skalski K.: Obróbka plastyczna i spawalnictwo. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1979.
- 22) Metaloznawstwo. Butnicki S. (red.). Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1991.
- 23) Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe. WNT, Warszawa 2017.
- 24) Przepisy klasyfikacyjne. Polski Rejestr Statków, Gdańsk 2019.
- 25) Roliński Z.: Tensometria oporowa: podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań. WNT, Warszawa 1981.
- 26) Romanowski W.P.: Poradnik obróbki plastycznej na zimno. WNT, Warszawa 1976.
- 27) Skoblik R., Wilczewski L.: Odlewnictwo i obróbka plastyczna: laboratorium. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1997.
- 28) Walczyk Z.: Wytrzymałość materiałów. Tom 1. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 1998.
- 29) Ziemia H.: Ćwiczenia laboratoryjne z budowy maszyn. Część 2. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1981.
- 30) PN-74/H-04327: Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania–ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych.
- 31) PN-76/H-04325: Badanie metali na zmęczenie. Pojęcia podstawowe i ogólne wytyczne przygotowania próbek oraz przeprowadzenia prób.
- 32) PN-76/H-04326: Badanie metali na zmęczenie. Próba zginania.
- 33) PN-84/H-04333: Metale. Metoda badania prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego przy stałej amplitudzie obciążenia.
- 34) PN-84/M-84702: Dźwignice. Zawiesia chwytne i zaczepowe specjalnego przeznaczenia. Ogólne wymagania i badania.
- 35) PN-88/M-69710: Spawalnictwo. Próba statyczna rozciągania doczołowych złączy spajanych.
- 36) PN-92/M-84720: Zawiesia z lin stalowych i włókiennych. Ogólne wymagania i badania.
- 37) PN-EN 10264-1:2012: Drut stalowy i wyroby z drutu. Drut stalowy na liny. Część 1: Wymagania ogólne.
- 38) PN-EN 10274:2002: Metale. Próba uderowa spadającym ciężarem.
- 39) PN-EN 10319-1:2005: Metale. Badanie relaksacji naprężeń w próbie rozciągania. Część 1: Metoda badania przy użyciu maszyn wytrzymałościowych.
- 40) PN-EN 12385-1+A1:2009: Liny stalowe. Bezpieczeństwo. Część 1: Wymagania ogólne.

- 41) PN-EN 13414-1+A2:2009: Zawiesia z lin stalowych. Bezpieczeństwo. Część 1: Zawiesia do podnoszenia ogólnego zastosowania.
- 42) PN-EN 1492-4+A1:2008: Zawiesia włókienne. Bezpieczeństwo. Część 4: Zawiesia włókienne ogólnego przeznaczenia z naturalnych i syntetycznych lin włókiennych.
- 43) PN-EN 28749:2000: Kołki i kołki z korbami. Próba ścinania.
- 44) PN-EN 876:1999: Spawalnictwo. Badania niszczące spawanych złączy metali. Próba rozciągania próbek wzdłużnych ze spoin złączy spawanych.
- 45) PN-EN ISO 12737:2006: Metale. Określanie odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia.
- 46) PN-EN ISO 148-1:2010: Metale. Próba udarności sposobem Charpy'ego. Część 1: Metoda badania.
- 47) PN-EN ISO 148-2:2009: Metale. Próba udarności Charpy'ego. Część 2: Sprawdzanie młotów wahadłowych.
- 48) PN-EN ISO 204:2009: Metale. Próba pełzania przy jednoosiowym rozciąganiu. Metoda badania.
- 49) PN-EN ISO 4136:2013-05: Badania niszczące spawanych złączy metali. Próba rozciągania próbek poprzecznych.
- 50) PN-EN ISO 5173:2010: Badania niszczące spoin w materiałach metalowych. Badanie na zginanie.
- 51) PN-EN ISO 6507-1:2007: Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 1: Metoda badań.
- 52) PN-EN ISO 6507-2:2007: Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 2: Sprawdzanie i wzorcowanie twardościomierzy.
- 53) PN-EN ISO 6507-3:2007: Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 3: Kalibracja wzorców odniesienia.
- 54) PN-EN ISO 6507-4:2007: Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 4: Tablice wartości twardości.
- 55) PN-EN ISO 6508-1:2007: Metale. Pomiar twardości sposobem Rockwella. Część 1: Metoda badań (skale A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).
- 56) PN-EN ISO 6508-2:2007: Metale. Pomiar twardości sposobem Rockwella. Część 2: Sprawdzanie i wzorcowanie twardościomierzy (skale A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).
- 57) PN-EN ISO 6508-3:2007: Metale. Pomiar twardości sposobem Rockwella. Część 3: Kalibracja wzorców odniesienia (skale A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).
- 58) PN-EN ISO 6892-1:2010: Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
- 59) PN-EN ISO 6892-2:2011: Metale. Próba rozciągania. Metoda badania w podwyższonej temperaturze.
- 60) PN-EN ISO 7438:2006: Metale. Próba zginania.

- 61) PN-EN ISO 7500-1:2005: Metale: Sprawdzanie statycznych jednoosiowych maszyn wytrzymałościowych. Część 1: Maszyny wytrzymałościowe rozciągające/ściskające. Sprawdzanie i wzorcowanie układu pomiarowego siły.
- 62) PN-EN ISO 8491:2005: Metale. Rury. Próba zginania.
- 63) PN-EN ISO 8492:2014-02: Metale. Rury. Próba spłaszczania.
- 64) PN-EN ISO 8493:2005: Metale. Rury. Próba rozciągania.
- 65) PN-EN ISO 8494:2014-02: Metale. Rury. Próba wywijania kołnierza.
- 66) PN-EN ISO 8495:2014-02: Metale. Rury. Próba rozciągania pierścienia.
- 67) PN-EN ISO 8496:2014-02: Metale. Rury. Próba rozciągania pierścienia.
- 68) PN-EN ISO 898-1:2013-06: Własności mechaniczne części złącznych wykonanych ze stali węglowej oraz stopowej. Część 1: Śruby i śruby dwustronne o określonych klasach własności. Gwint zwykły i drobnozwojowy.
- 69) PN-EN ISO 9016:2011: Badania niszczące złączy spawanych metali. Badanie udarności. Usytuowanie próbek, kierunek karbu i badanie.
- 70) PN-EN ISO 946:1994: Próba udarności na próbkach bez karbu.
- 71) PN-H 04405:1962: Próba podwójnego zginania i próba zawijania ze zginaniem blach cienkich.
- 72) PN-H 04411:1983: Próba spęczania metali.
- 73) PN-ISO 7799:2002: Metale. Blachy i taśmy o grubości do 3 mm. Próba przeginania.
- 74) PN-ISO 7800:1996: Metale. Drut. Próba jednokierunkowego skręcania.
- 75) PN-ISO 7801:1996: Metale. Drut. Próba przeginania dwukierunkowego.
- 76) PN-ISO 7802:2000: Metale. Drut. Próba nawijania.
- 77) PN-EN ISO 6506-1: 2014-12: Metale. Pomiar twardości sposobem Brinella. Część 1: Metoda badań.
- 78) PN-EN ISO 6506-2: 2014-12: Metale. Pomiar twardości sposobem Brinella. Część 2: Wymagania odnośnie twardościomierzy.
- 79) PN-EN ISO 6506-3: 2014-12: Metale. Pomiar twardości sposobem Brinella. Część 3: Kalibracje wzorców twardościomierzy.
- 80) PN-EN ISO 6506-4: 2014-12: Metale. Pomiar twardości sposobem Brinella. Część 4: Tablice wartości twardości.
- 81) PN-H-04320: 1957: Próba statyczna ściskania metali.