
Politechnika Lubelska



MECHANIKA

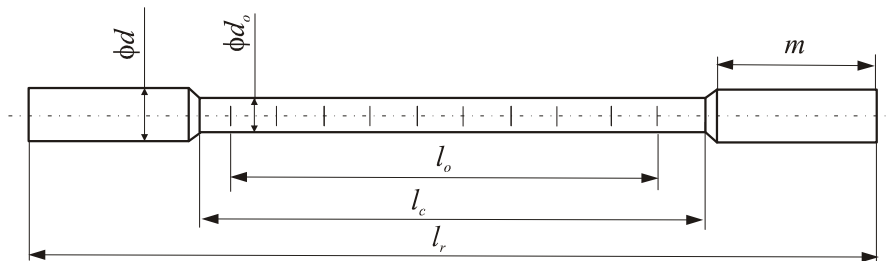
Laboratorium wytrzymałości materiałów ...

Ćwiczenie 1 - Statyczna próba rozciągania

Przygotował: Andrzej Teter
(do użytku wewnętrznego)

Statyczna próba rozciągania

Statyczną próbę rozciągania wykonujemy zgodnie z normą PN-EN 10002-1:2004. Do badań używamy próbek o znormalizowanych kształtach i wymiarach. Składają się one z części roboczej (odcinek próbki o długości L_c) o stałym przekroju: kołowym, prostokątnym lub sześciokątnym oraz z uchwytów, zwanych główkami (rys. 1). Dla próbek proporcjonalnych długość pomiarowa L_o jest ustaloną wielokrotnością średnicy lub grubości początkowej: $L_o = p \cdot d_o$ (p - **krotność próbki** czyli stosunek długości pomiarowej do średnicy lub grubości początkowej). Dla próbek okrągłych, kwadratowych i sześciokątnych przyjmuje się zwykle krotność próbki $p = 5$ lub $p = 10$. Przed wykonaniem badania należy oznaczyć na części roboczej próbki długość pomiarową L_o i podzielić ją na działki w odstępach co 5 lub 10 mm.



Rys. 1

Statyczne próby rozciągania przeprowadza się na tzw. **maszynach wytrzymałościowych** (zrywarkach). Są to maszyny o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych, jednakże spełniające wymagania ujęte w normach. Próbkę umieszcza się w uchwytach maszyny wytrzymałościowej i obciąża quasistatyczną osiową siłą P . W miarę narastania obciążenia P mierzymy ekstensometrem rzeczywistą długość L_1 oraz obliczamy dla każdej wartości siły P przyrost wydłużenia $\Delta L = L_1 - L_o$, a następnie **odkształcenie względne**:

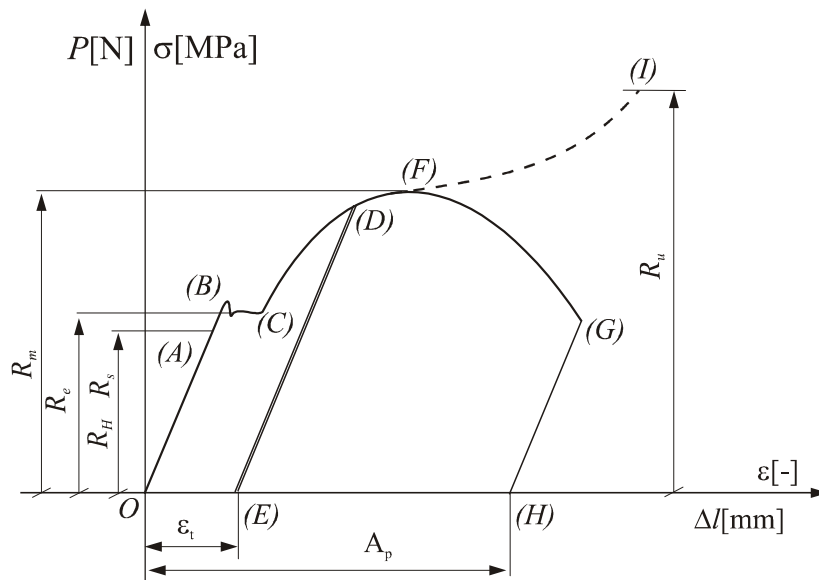
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_o} \quad (1)$$

Dodatkowo dla każdego odczytu obliczamy **naprężenie normalne** σ przez podzielenie chwilowej siły P przez początkowe pole przekroju poprzecznego S_o :

$$\sigma = \frac{P}{S_o} \quad (2)$$

Na podstawie tych danych można wykonać wykres siła-wydłużenie lub naprężenie-odkształcenie inaczej nazywany **umownym wykresem rozciągania** (linia OG rys. 2), przyjmując ΔL lub ε jako odcięłą oraz P lub σ jako rzędną. Wykresy

rozciągania dla różnych materiałów bardzo się różnią. Ogólnie wyróżniamy dwie grupy materiałowe, są to materiały sprężysto-plastyczne i materiały kruche. Materiały sprężysto-plastyczne, do których należy stal niskowęglowa konstrukcyjna, jak również wiele stopów innych metali, można dodatkowo podzielić na materiały z wyraźną granicą plastyczności (rys. 2) i bez wyraźnej granicy plastyczności (brak odcinka BC – rys. 2). Jednakże wspólną ich cechą jest to, że pod wpływem narastającego obciążenia odkształcają się plastycznie. Podczas gdy materiały kruche ulegają zniszczeniu nie wykazując praktycznie żadnych plastycznych odkształceń. Jeżeli wykres rozciągania sporządzić dla rzeczywistych naprężeń normalnych obliczanych jako stosunek siły P do rzeczywistego pola przekroju poprzecznego, które dla pewnych materiałów może być znacznie mniejsze od początkowego i rzeczywistych odkształceń otrzymuje się tzw. **rzeczywisty wykres rozciągania** (krzywa OI rys. 2).



Rys. 2

Różnice pomiędzy umownym a rzeczywistym wykresem rozciągania można zaobserwować jedynie na ostatnim odcinku DG i DI ponieważ dopiero w tym obszarze następuje duża zmiana pola przekroju poprzecznego, a szczególnie w fazie tworzenia się szyjki (punkt F). Na wykresie rozciągania dla materiałów z wyraźną granicą plastyczności wyróżnia się kilka charakterystycznych obszarów:

- 1) Zakres liniowo-sprężysty – odcinek OA .

Początkowy fragment wykresu OA to linia prosta, która jest również nazywana **zakresem liniowym** lub **zakresem stosowalności prawa Hooke'a**.

Odcinek ten opisuje zależność (**prawo Hooke'a**):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

Odwrotność współczynnika proporcjonalności oznaczona E jest nazywana

modułem Young’a lub **współczynnikiem sprężystości wzdłużnej**. W interpretacji geometrycznej moduł E jest równy tangensowi kąta nachylenia odcinka liniowego OA . Punkt graniczny A tego zakresu nosi nazwę **granicy proporcjonalności** i jest oznaczony R_H :

$$R_H = \frac{P_H}{S_o} \quad (4)$$

gdzie: P_H – siła odpowiadająca punktowi A .

- 2) Zakres nieliniowo sprężysty – odcinek AB .

Wprowadza się również pojęcie **granicy sprężystości** R_s . Granica sprężystości dla danego materiału jest wartością naprężenia, poza którą materiał doznaje trwałych odkształceń po usunięciu naprężeń tzn. po usunięciu obciążeń nie odzyskuje swoich wymiarów początkowych. Granica sprężystości leży nieco powyżej granicy proporcjonalności. Doświadczalne wyznaczenie granicy sprężystości jest bardzo trudne i dlatego jej dokładne położenie na wykresie naprężenie-odkształcenie nie jest zwykle znane, nawet gdy wiadomo, że jest wyższe niż granica proporcjonalności. W praktyce granicę proporcjonalności i granicę sprężystości zwykle się utożsamia. Ze względu na trudności pomiarowe przyjmuje się **umowną granicę sprężystości** $R_{0,05}$. Jest to naprężenie wywołujące w próbce trwałe odkształcenie $\epsilon_t=0,05\%$:

$$R_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{S_o} \quad (5)$$

gdzie: $P_{0,05}$ – siła, która wywołuje w próbce trwałe odkształcenie 0,05%.

- 3) Zakres sprężysto-plastyczny – odcinek BG .

Naprężenie, przy którym następuje początek plastycznego płynięcia, nosi nazwę **wyraźnej granicy plastyczności** R_e :

$$R_e = \frac{P_e}{S_o} \quad (6)$$

gdzie: P_e – siła, która wywołuje wyraźny wzrost wydłużenia próbki.

Granice plastyczności można wyznaczyć w trakcie próby rozciągania przez obserwację ruchu wskazówki urządzenia pomiarowego. Po równomiernym wychylaniu się można zauważyć zatrzymanie lub nagły spadek obciążenia do pewnej mniejszej wartości, co utrzymuje się przez pewien okres czasu przy jednoczesnym wzroście wydłużenia próbki. Podczas uważnego prowadzenia próby można dokonać rozróżnienia pomiędzy górną R_{eH} (pierwsza wartość szczytowa) i dolną granicą plastyczności R_{eL} (najmniejsza wartość obciążenia w fazie uplastycznienia – odcinek BC). Ponieważ górna granica plastyczności jest zmienna, do określenia granicy plastyczności materiału należy wziąć dolną granicę plastyczności. Odcinek BC nazwano **obszarem plastycznego płynięcia**. Na odcinku CF następuje umocnienie materiału i ciągły wzrost obciążenia. Naprężenie maksymalne R_m odpowiada-

jące największemu obciążeniu (punkt F) przyłożonemu do próbki nazywa się **doraźną wytrzymałością na rozciąganie**:

$$R_m = \frac{P_m}{S_o} \quad (7)$$

gdzie: P_m – największa siła rozciągająca próbkę. Po przekroczeniu punktu F na próbce pojawia się przewężenie nazywane **szyjką**. Po czym następuje gwałtowne pęknięcie. Naprężenie R_u odpowiadające pęknięciu próbki nosi nazwę **naprężeń rozrywających**:

$$R_u = \frac{P_u}{S_u} \quad (8)$$

gdzie: P_u – siła rozciągająca w chwili rozerwania próbki, S_u – powierzchnia przekroju poprzecznego w miejscu rozerwania.

Dla materiałów plastycznych bez wyraźnej granicy plastyczności wykres rozciągania jest bardzo podobny do opisanego wcześniej wykresu rozciągania dla materiałów z wyraźną granicą plastyczności. Jedyną różnicą polega na tym, że w ogóle na wykresie nie można ustalić granicy plastyczności, charakteryzującej się poziomym odcinkiem BC na krzywej naprężenie-odkształcenie. Dla takich materiałów wprowadzono **umowną granicę plastyczności** $R_{0,2}$. Granica ta odpowiada $\epsilon_t=0,2\%$ odkształcenia trwałego, mierzonego w stosunku do pierwotnej długości pomiarowej L_o :

$$R_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{S_o} \quad (9)$$

gdzie: $P_{0,2}$ – siła wywołująca w próbce trwałe odkształcenie równe $0,2\%$.

Wymienione wyżej granice określają właściwości wytrzymałościowe materiału próbki. Natomiast właściwości plastyczne materiału przy rozciąganiu można scharakteryzować za pomocą: wydłużenia względnego A_p oraz przewężenia względnego Z próbki. **Względne wydłużenie** jest zdefiniowane następująco:

$$A_p = \frac{L_u - L_o}{L_o} \cdot 100\% \quad (10)$$

gdzie: L_o – długość początkowa, L_u – długość po zerwaniu próbki, p – krotność próbki. **Względne przewężenie** jest miarą zmniejszenia się pola przekroju poprzecznego w miejscu zerwania i wynosi:

$$Z = \frac{S_o - S_u}{S_o} \cdot 100\% \quad (11)$$

gdzie: S_o – początkowe pole przekroju poprzecznego, S_u – końcowe pole przekroju poprzecznego w miejscu zerwania próbki.

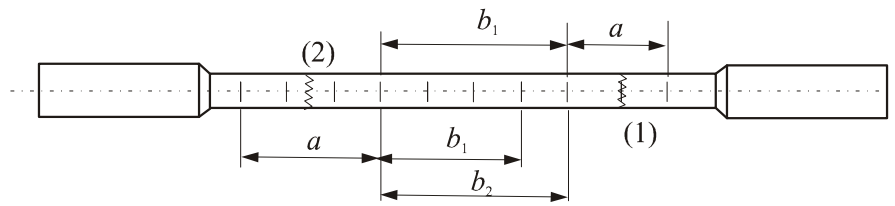
Materiały, które ulegają zniszczeniu podczas rozciągania przy względnie niewielkich odkształceniach, noszą nazwę materiałów kruchych. Materiały te

ulegają zniszczeniu przy niewielkich odkształceniach po przekroczeniu granicy proporcjonalności R_H , a napężenie w chwili pęknięcia R_u jest takie samo jak wytrzymałość doraźna R_m . Stale wysokowęglowe zachowują się jak materiały kruche; charakteryzują się bardzo wysoką granicą plastyczności, lecz pęknięcie następuje przy wydłużeniu względnym wynoszącym zaledwie kilka procent.

Obliczanie długości pomiarowej po zerwaniu

Po rozerwaniu próbki dla odcinka pomiarowego L_o należy zmierzyć długość pomiarową L_u . W tym celu obie części próbki składa się ze sobą tak, aby ściśle do siebie przylegały, a ich osie stanowiły linię prostą. Jeżeli miejsce zerwania znajduje się w odległości $0,25 \cdot L_o$ (dla próbki o krotności $p=10$) od skrajnych znaków wyznaczających odcinek pomiarowy L_o to długość po zerwaniu mierzy się tak, jakby szyjka powstała w środku próbki. Wystarczy więc zmierzyć odległości pomiędzy skrajnymi znakami. Dla próbki pięciokrotnej długość po zerwaniu można zmierzyć tak samo, ale pod warunkiem, że miejsce zerwania znajduje się w odległości $1/3 \cdot L_o$ od skrajnych znaków. Pomiaru tego dokonuje się posługując uprzednio naniesionymi na próbkę działkami. Dzieląc długość pomiarową L_o przez odległość między działkami (np. 10 mm), uzyskujemy liczbę działek N odpowiadającą długości pomiarowej. Mierząc w zerwanej próbce długość odcinka zawierającego N działek, uzyskujemy długość pomiarową po zerwaniu L_u . Jeżeli zerwanie nastąpi poza zakresem określonym uprzednio jako środkowa część próbki, to długość L_u oblicza się stosując zasadę sztucznej symetrii. Wykorzystuje się przy tym fakt jednakowego wydłużenia działek, na jakie próbka została podzielona, położonych symetrycznie w stosunku do miejsca zerwania. W tym przypadku końcową długość pomiarową po zerwaniu L_u należy mierzyć w następujący sposób:

1. Obliczyć liczbę działek N odpowiadającą długości pomiarowej L_o .
2. Na krótszej części próbki oblicza się liczbę działek, a następnie na dłuższej części oznacza taką samą ich liczbę tak aby pęknięcie dzieliło wyznaczony odcinek symetrycznie. Wyznaczony odcinek liczy n działek i ma długość a (rys. 3).
3. Brakującą liczbę działek $N-n$ wyznaczamy w następujący sposób:
 - jeżeli $N-n$ jest liczbą parzystą (1), to na dłuższej części próbki należy zmierzyć długość odcinka b_1 odpowiadający $0,5 \cdot (N-n)$ liczbie działek. Długość po zerwaniu wynosi: $L_u = a + 2b_1$;
 - jeżeli $N-n$ jest liczbą nieparzystą (2) to długość L_u oblicza się dodając do długości a dwa odcinki o długościach: b_1 , odpowiadający $0,5 \cdot (N-n-1)$ działkom i b_2 , odpowiadający $0,5 \cdot (N-n+1)$ działkom. Długość po zerwaniu wynosi: $L_u = a + b_1 + b_2$.



Rys. 3

Wyznaczanie modułu Younga E

Współczynnik sprężystości wzdłużnej E oblicza się ze wzoru:

$$E = \frac{(P_{i+1} - P_i) \cdot L_o}{(\Delta l_{i+1} - \Delta l_i) \cdot S_o} \quad (12)$$

gdzie: P_{i+1} i P_i – siły obciążające odczytane w zakresie liniowo-sprężystym dla dwóch dowolnych pomiarów; Δl_{i+1} , Δl_i – wydłużenie, z których pierwsze odpowiada sile P_{i+1} , a drugie sile P_i , L_o – długość początkowa, S_o – początkowe pole przekroju poprzecznego. Wartości sił i wydłużeń należy odczytać z wykresu rozciągania.

**Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny
Katedra Mechaniki Stosowanej
Laboratorium Wytrzymałości Materiałów**

<i>Imię i nazwisko</i>	<i>Grupa</i>	<i>Data wykonania</i>	<i>Prowadzący</i>	<i>Ocena</i>

Laboratorium Wytrzymałości Materiałów

Statyczna próba rozciągania metali

1. Cel ćwiczenia.

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie doświadczalne własności mechanicznych stali konstrukcyjnych zgodnie z normą PN-EN 10002-1:2004 oraz wizualizacja związku pomiędzy naprężeniami i odkształceniami w całym zakresie pracy rozciąganej próbki.

2. Opis stanowiska badawczego

Statyczna próba rozciągania wykonywana jest na stanowisku badawczym składającym się z mechanicznej zrywarki Z100 firmy Zwick wyposażonej w ekstensometr oraz komputerowego układu sterującego. Dodatkowo do pomiarów próbki przed i po zerwaniu na stanowisku znajdują się przyrządy pomiarowe: suwmiarka oraz śruba mikrometryczna.

3. Przebieg ćwiczenia

1. Przed przystąpieniem do próby, we własnym zakresie należy szczegółowo zapoznać się z normą PN-EN 10002-1:2004.
2. Zmierzyć wszystkie wymiary próbki: L_c , L_b , L_o , m , ϕd_o , ϕd i sprawdzić czy próbka jest zgodna z normą.
3. Wyskalować próbkę w urządzeniu skalującym. Skalowanie polega na tym, że na powierzchni roboczej nacina się kreski co 5 lub 10 mm. Sposób wykonania nacięć powinien wykluczać powstawanie karbów.
4. Na części roboczej zaznaczyć długości pomiarowe L_o dla $p=10$ oraz dla $p=5$. Następnie kilkakrotnie w różnych miejscach śrubą mikrometryczną zmierzyć średnicę próbki ϕd_o wyniki wpisać do tabeli pomiarów. Do obli-

- czeń powierzchni przekroju poprzecznego S_o należy przyjąć wartość średnią.
5. Zamocować próbkę w uchwytach maszyny.
 6. Zwiększając obciążenie próbki doprowadzić do jej zniszczenia. Zachowanie próbki obserwować na wykresie rozciągania wyświetlanym na ekranie komputera.
 7. W zakresie liniowo-sprężystym – odcinek OA (rys. 2) wykonać dodatkowo odciążanie próbki. Sprawdzić czy w cyklu obciążanie-odciążania, dla tego zakresu zmienia się wartość modułu Young'a oraz czy pozostają odkształcenia trwałe. Analogiczne obserwacje wykonać dla cyklu obciążanie-odciążania w zakresie sprężysto-plastycznym.
 8. Po zerwaniu wymontować próbkę z uchwytów zrywarki. Sprawdzić, że wyczuwalnie wzrosła temperatura próbki.
 9. W specjalnych uchwytach zmontować próbkę tak aby fragmenty próbki w miejscu rozerwania bardzo dokładnie do siebie przylegały.
 10. Zmierzyć odcinek odpowiadający długości pomiarowej L_o po zerwaniu L_u (dla $p=10$ oraz $p=5$) oraz najmniejszą średnicę próbki ϕ_u w miejscu jej zerwania.
 11. Z zarejestrowanego wykresu rozciągania odczytać:
 - a) w zakresie liniowym, dla kilku wskazanych przez prowadzącego punktów, wartości sił P i odpowiadający im przyrost długości próbki: Δl . Następnie z prawa Hooke'a obliczyć wartość modułu Young'a - E .
 - b) wartości: siły uplastyczniającej próbkę P_e , największej siły rozciągającej P_m , oraz siły rozrywającej próbkę P_u .
 12. Obliczyć wartości: wyraźnej granicy plastyczności R_e , wytrzymałości na rozciąganie R_m , naprężenia rozrywające R_u , względne wydłużenia A_5 i A_{10} i względne przewężenie Z .

4. Wykonanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać następujące dane:

1. Charakterystyka materiału.
2. Charakterystyka użytych urządzeń pomiarowych.
3. Dane dotyczące próbki i warunki badania.
4. Wyniki pomiarów i obliczeń:
 - a) siły odpowiadające wyznaczonym wielkościom,
 - b) wykres rozciągania z zaznaczeniem charakterystycznych punktów,
 - c) wzory i wyniki obliczeń charakterystycznych wielkości wytrzymałościowych,
 - d) określenie miejsca zerwania i wad występujących w przełomie,
 - e) opis przełomu.
5. Wnioski i uwagi końcowe.

5. Rysunek badanej próbki.**6. Charakterystyka badanej próbki:****7. Warunki badań i charakterystyka użytych urządzeń.****8. Wymiary próbki przed próbą**

Tabela 1.

Lp	ϕd_0	ϕd	m	L_c	L_t	P	L_0	S_0
	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
1								
2								
3								
średnia								

9. Wyniki pomiarów i obliczeń.

Tabela 2.

Lp	P	Δl	E
	[...]	[...]	[...]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
Średnia:			

Tabela 3.

d_u	S_u	P_e	P_m	P_u	R_e	R_m	R_u	A_5	A_{10}	Z
[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]

10. Wykres rozciągania z zaznaczeniem charakterystycznych punktów (zaznaczyć cykle obciążenia).

11. Opis przełomu, wady.

12. Stwierdzenie ważności próby.

13. Wnioski i uwagi końcowe.