

**POLITECHNIKA SZCZECIŃSKA  
KATEDRA MECHANIKI I PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN**

**Ćwiczenia laboratoryjne  
z Wytrzymałości Materiałów**

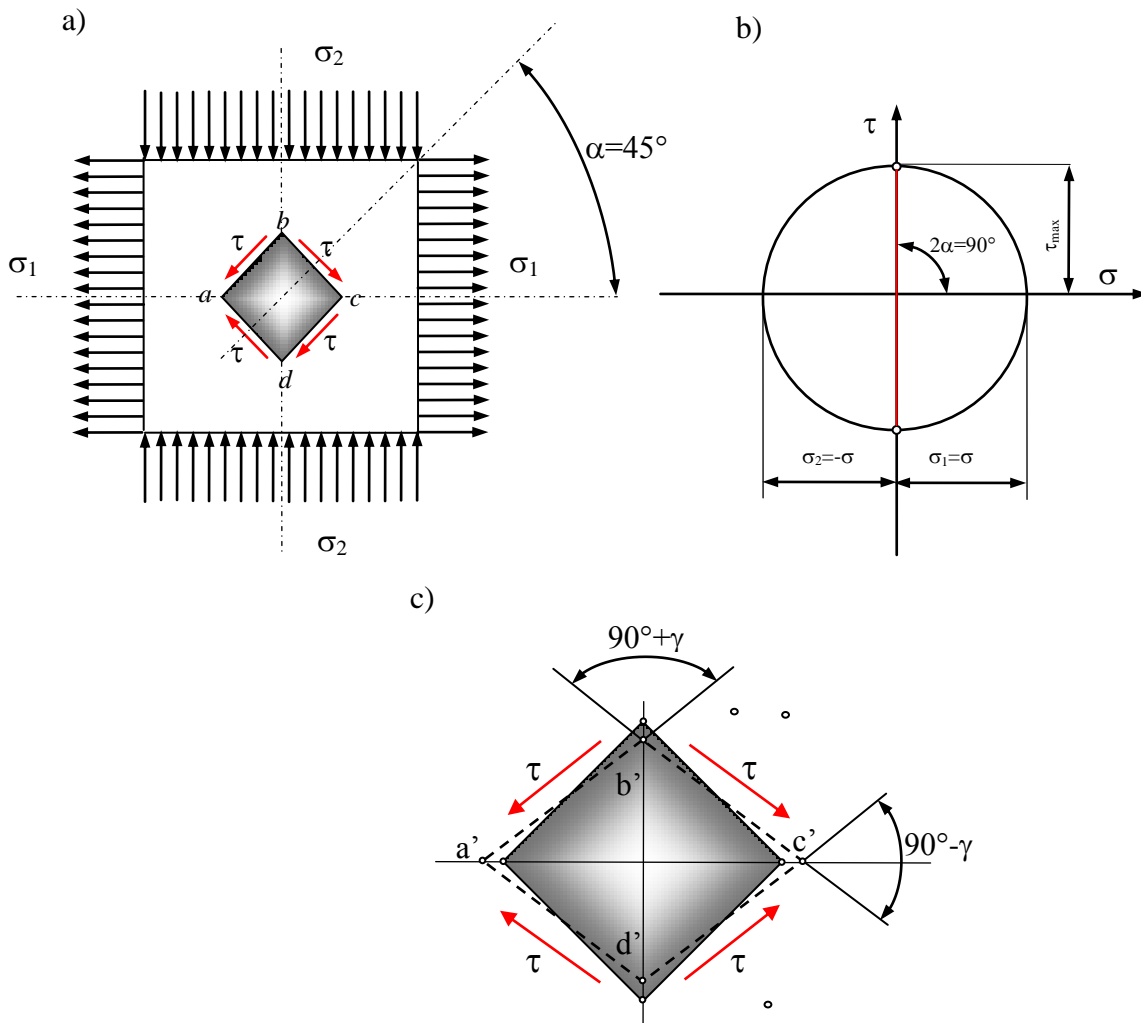
**Statyczna próba ścinania**

**Opracował : dr inż. Konrad Konowski**

**Szczecin 2005 r.**

## 1. Wprowadzenie

Metodyka obliczania elementów maszyn narażonych na ścinanie w dużej mierze opiera się na teorii czystego ścinania. Stan czystego ścinania można przedstawić jako szczególny przypadek dwuosowego stanu naprężenia, w którym  $\sigma_1 = -\sigma_2 = \sigma$  (rys.1a), przy założeniu  $\varepsilon_3 = 0$ . Graficzną prezentacją tego stanu jest koło Mohra (rys.1b). Maksymalne naprężenia ścinające w płaszczyznach usytuowanych pod kątem  $45^\circ$  do kierunków głównych wynoszą  $\tau_{\max} = \pm\sigma$ , a naprężenia normalne w tych kierunkach są równe zero. Oznacza to że kwadratowy element  $abcd$  obrócony o kąt  $45^\circ$  względem kierunków głównych jest obciążony wyłącznie naprężeniami ścinającymi.



Rys.1. Dwuosowy stan naprężenia: naprężenia styczne (a), koło Mohra (b), odkształcenia postaciowe (c)

Odkształcenie elementu  $abcd$  pokazano w powiększeniu na rys. 1c. Ponieważ na krawędziach tego elementu nie występują naprężenia normalne, długość tych krawędzi w procesie deformacji nie ulega zmianie. Przekątna pozioma  $ac$  ulega wydłużeniu, a przekątna pionowa  $bd$  ulega skróceniu. Kształt elementu po odkształceniu zaznaczono liniami przerywanymi. Kąty proste które były między krawędziami elementu nie odkształconego w narożach  $a$  i  $c$  wynoszą  $90^\circ - \gamma$ , a kąty w narożach  $b$  i  $d$  wynoszą  $90^\circ + \gamma$ , gdzie  $\gamma$  oznacza odkształcenie kątowe ( postaciowe) elementu. Wielkość  $\gamma$  jest liczbą i nosi nazwę **kąta odkształcenia**

**postaciowego.** W zakresie sprężystym można założyć, że kąt odkształcenia postaciowego jest proporcjonalny do naprężeń ścinających  $\tau$ , które tworzy ten kąt.

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (1)$$

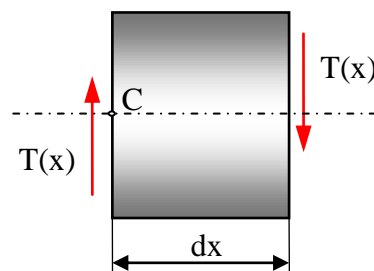
gdzie:  $G$  – jest współczynnikiem proporcjonalności nazywany modułem odkształcenia postaciowego lub modułem ścinania.

W przypadku czystego ścinania nie zachodzi zmiana objętości elementu w trakcie deformacji, a jedynie zmiana postaci.

W takich warunkach znalazłby się np. pręt o przekroju prostokątnym w którym wystąpiłyby tylko siły poprzeczne. Z analizy stanu obciążenia elementarnego wycinka pręta (rys.2) wynika że, realizacja takiego stanu nie jest możliwa bez udziału dodatkowego obciążenia zewnętrznego, co wynika bezpośrednio z zależności:

$$\frac{dM_g(x)}{dx} = T(x) \quad (2)$$

Wycinek taki nie może pozostawać również w stanie równowagi ( $\sum M_c \neq 0$ ). Tak więc w przeciwieństwie do rozciągania (ściskania) lub zginania, ścinanie prętów nie może w tych warunkach wystąpić w postaci „czystej” i jest zwykle połączone ze zginaniem  $M_g(x) \neq 0$ .



Rys2. Elementarny wycinek pręta obciążony siłami poprzecznymi

Przykładowy rozkład naprężeń stycznych  $\tau$  w przekroju prostokątnym belki, przedstawiono na rys.3. Został on wyznaczony na podstawie wzoru Żurawskiego:

$$\tau = \frac{T \cdot S_z}{b \cdot I_z} \quad (3)$$

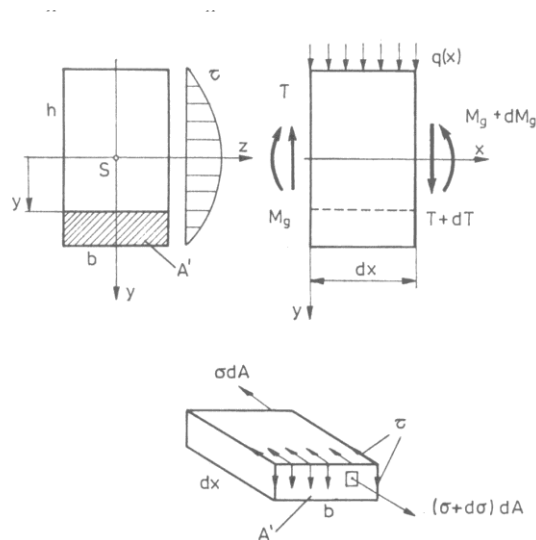
gdzie:  $T$  – jest to siła poprzeczna w przekroju belki

$S_z$  – jest to moment statyczny odciętej (zakreskowanej) części przekroju belki względem osi obojętnej  $z$

$I_z$  – jest to moment bezwładności przekroju poprzecznego względem osi  $z$

$b$  – jest to szerokość przekroju poprzecznego belki

Wzór (3) został wyprowadzony przy założeniu że, siła poprzeczna  $T$  wywołuje w punktach leżących w odległości  $y$  od linii obojętnej, stałe na całej szerokości przekroju normalnego, naprężenia styczne  $\tau$ . Zgodnie z twierdzeniem o równości naprężeń stycznych w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych, muszą wystąpić takie same naprężenia styczne  $\tau$  w płaszczyźnie odcinającej dolną część elementu.



Rys.3. Rozkład naprężeń stycznych  $\tau$  w przekroju poprzecznym belki

W przekroju prostokątnym ( o wymiarach  $b, h$ ) rozkład naprężeń  $\tau$  charakter paraboliczny:

$$\tau = \frac{3 \cdot T}{2 \cdot b h} \left( 1 - 4 \frac{y^2}{h^2} \right) \quad (4)$$

Maksymalne naprężenia styczne  $\tau_{\max}$  występują w warstwie obojętnej dla  $y=0$ . i wynoszą:

$$\tau_{\max} = \frac{3 \cdot T}{2 \cdot b h} \quad (5)$$

Z twierdzenia o równości naprężeń stycznych w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych wynika, że w przekroju pręta nie mogą działać naprężenia styczne prostopadłe do konturu stanowiącego jego brzeg.. Gdyby bowiem tak było, to na powierzchni pręta powinno działać odpowiednie obciążenie zewnętrzne, a jest to przecież powierzchnia nie obciążona. Ze wzoru (3) wynika że naprężenia styczne  $\tau$  zmieniają się wzdłuż wysokości przekroju, a więc zmieniają się również kąty odkształcenia postaciowego  $\gamma$ , wobec tego przekrój ten nie może pozostawać płaski.

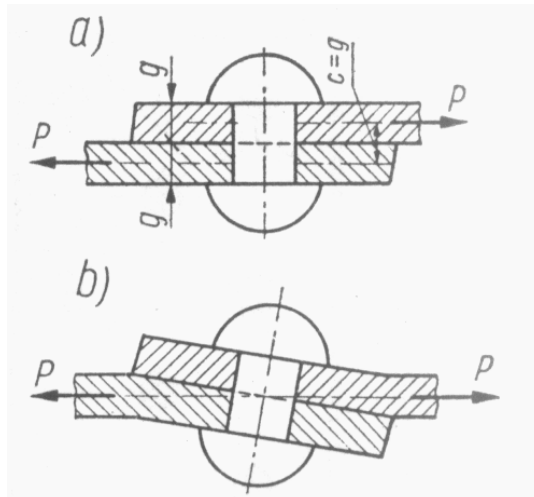
Z czystym ścinaniem nie mamy praktycznie do czynienia przy obliczaniu elementów konstrukcyjnych maszyn. Istnieje jednak szereg technicznie ważnych przypadków, kiedy decydujący wpływ na stan naprężenia mają siły poprzeczne i naprężenia styczne. Zwykle pomija się przy tym, występujące jednocześnie naprężenia wywołane zginaniem. Przyjmuje się wtedy szereg istotnych założeń upraszczających. Mamy wówczas do czynienia z tzw. **ścinaniem technologicznym**. Do ważniejszych praktycznie połączeń, w których występuje ścinanie technologiczne można zaliczyć połączenia nitowane i spawane konstrukcji metalowych. W połączeniach nitowych (rys.4) zakłada się że kierunek siły tnącej pokrywa się z osią symetrii przekroju poprzecznego nita, (środek ścinania pokrywa się z środkiem ciężkości przekroju) a rozkład naprężeń stycznych jest równomierny na całym przekroju. Kierunek naprężeń stycznych zakłada się jako równoległy do kierunku działającej siły  $T$ , a średnią wartość naprężeń stycznych  $\tau_{sr}$  wyznacza się z zależności:

$$\tau_{sr} = \frac{T}{A} \quad (6)$$

gdzie : T – jest to siła tnąca

A – jest to pole przekroju poprzecznego nitu

Przykładem takiego połączenia nitowego jest węzeł złożony z dwóch blach połączonych na zakładkę ( rys.4). Siła w przekroju poprzecznym ścinanego nitu  $T=P$ . Oprócz tego w przekroju tym występuje moment zginający i siła rozciągająca, a więc znajduje się on w złożonym stanie naprężenia



Rys. 4. Przykład obciążenia (a) i deformacji połączenia nitowego (b)

Pewien obraz zachowania się połączeń nitowanych, sworzniowych lub kołkowych, narażonych zazwyczaj na obciążenia tnące, odzwierciedla próba ścinania. Z wyników tej próby można korzystać przy określaniu wartości naprężeń dopuszczalnych, stosowanych do obliczeń wymienionych połączeń. Jest to więc próba o charakterze czysto praktycznym. Wytrzymałość na ścinanie jest wielkością umowną, porównawczą, dającą jedynie pewną orientacyjną ocenę jakości badanego materiału.

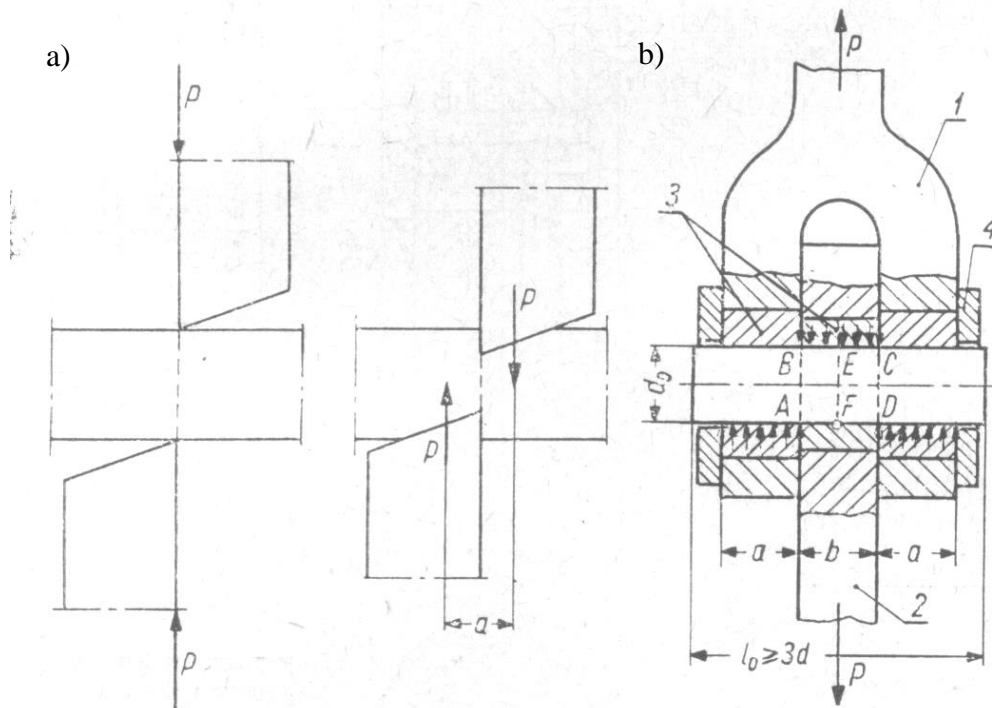
## 2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z praktycznym sposobem wykonania próby ścinania ( technologicznego) zgodnie z obowiązującą normą (PN-86/H-04321), używanymi do tego celu próbkami i urządzeniami oraz interpretacją i opracowaniem wyników próby. Wykonanie ćwiczenia polega na poddaniu próbek z materiału sprężysto-plastycznego i kruchego obciążeniu ścinającemu w przystosowanym do tego celu przyrządzie, obserwacji zachowania się tych próbek pod wzrastającym obciążeniem aż do ich zniszczenia, wyznaczeniu wytrzymałości na ścinanie oraz przeprowadzeniu analizy i dyskusji otrzymanych wyników.

## 3. Opis próby ścinania

Proste ścinanie dowolnej próbki rozumiane jako cięcie materiału może być dokonane tylko przez siły tnące, tzn. leżące na wspólnej płaszczyźnie i posiadające przeciwne zwroty. ( rys.5a) Warunek ten spełniałyby tylko dwa ostrza nieskończenie cienkie. W rzeczywistości noże o pewnej grubości, podczas wnikania w materiał prowadzą do rozsunięcia sił, które

tworzą parę sił, wywołując tym samym naprężenie zginające w próbce. Początku stopniowego niszczenia materiału należy doszukiwać się zwykle w zbyt wielkich naciskach noży, spowodowanych siłami  $P$ .



Rys.5. Działanie ostrzy podczas ścinania technologicznego (a), oraz schemat próby ścinania (b): 1-widelki, 2-wkładka ślizgowa ścinająca, 3-wymienne tuleje, 4- obejma

W praktyce laboratoryjnej przeprowadza się próbę ścinania technologicznego za pomocą prostych urządzeń przystosowanych do rozciągania (rys.5b) lub ściskania (rys.6) na uniwersalnych maszynach wytrzymałościowych np. ZD100, INSTRON 8501, INSTRON 8850.

Na rys. 5b przedstawiono układ widelkowy, pozwalający na zamocowanie w uchwytach zrywarki. Widelki 1 i ciągnó środkowe 2 zaopatruje się w wymienne tuleje 3 z twardej stali o dokładnie obrobionych otworach. W otwory te wstawia się próbkę o średnicy  $d_0 = 2 \div 25$  mm, starannie obrobioną na wymiar otworów w układzie widelkowym. Szerokości  $a$  i  $b$  przyjmuje się równe średnicy próbki  $d_0$ , a zatem długość próbki  $l_0 \geq 3d_0$ . Obejma 4 zapewnia możliwie bezluzowe, wzajemne przesuwanie się ciągnieł podczas ścinania. Stwarza ona zatem dogodniejsze warunki przy ścięciu próbki w przekrojach AB i DC, pod warunkiem, że nie powiększa zbyttno tarcia między przesuwającymi się elementami. W tabeli 1 przedstawiono stosowane wymiary próbek w próbie ścinania według PN.

Urządzenie do próby ścinania na prasie pokazano na rys.6. Różnica pomiędzy obydwoma urządzeniami sprowadza się do innego rozwiązania sposobu eliminowania luzów między ściankami przyrządu.

Próba ścinania polega na równoczesnym ścięciu w dwóch przekrojach metalowej próbki o przekroju okrągłym, w kierunku poprzecznym do jej osi podłużnej, odczytaniu największej wartości siły obciążającej i wyznaczeniu wytrzymałości na ścinaniu  $R_t$ . Luz między wkładką ustalającą  $a$  a wkładką ścinającą powinien wynosić najwyżej 0,10 mm. Twardość wkładek ustalających i ścinających powinna wynosić min. 700HV. Chropowatość próbek obrobionych mechanicznie nie powinna przekraczać  $R_a = 1,25 \mu\text{m}$ . Na powierzchni próbki nie powinno być pęknięć, rozwarstwień, wtrąceń niemetalicznych, wżerów powstałych w wyniku korozji i uszkodzeń mechanicznych.

Średnicę próbki należy zmierzyć co najmniej w trzech miejscach ( w środku i przy końcach) z dokładnością nie mniejszą niż 0,01 mm.

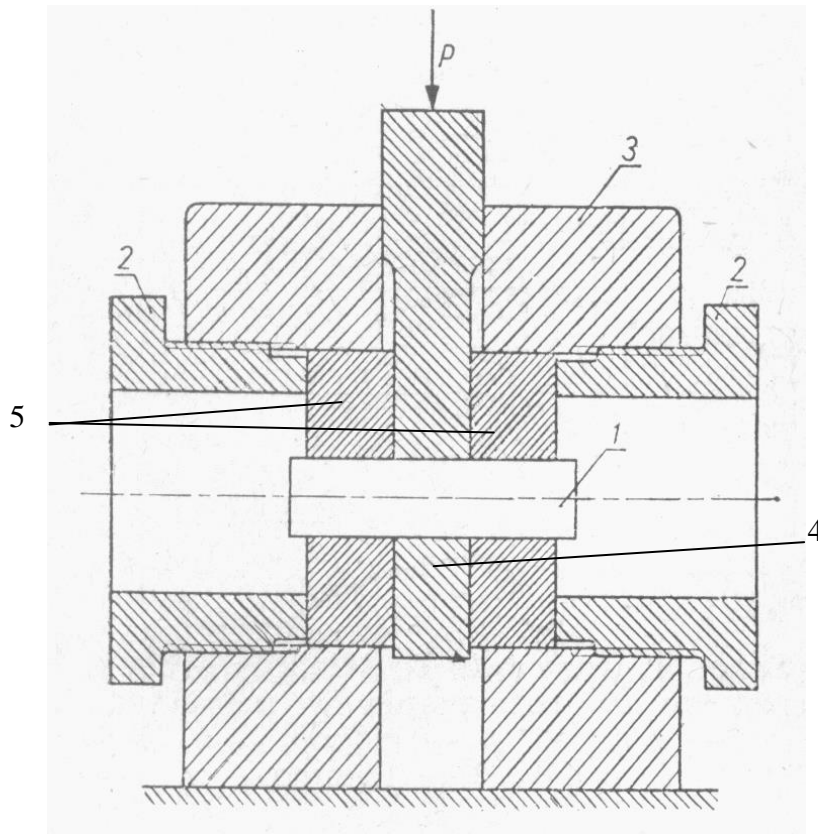
Tabela 1. Wymiary próbek na ścinanie wg. **PN-86/H-04321**

Średnica		Minimalna długość próbki <sup>a)</sup>
Wymiar nominalny $d_0$	Dopuszczalne odchyłki	
mm	mm	mm
2	-0,020 -0,370	50
3	-0,020 -0,370	
4	-0,030 -0,390	
5	-0,030 -0,390	
6	-0,030 -0,345	
8	-0,040 -0,370	
10	-0,013 -0,186	
12	-0,016 -0,193	
14	-0,016 -0,193	
16	-0,016 -0,193	
18	-0,016 -0,193	130
20	-0,020 -0,212	
25	-0,020 -0,212	
<sup>a)</sup> Najmniejsza długość próbki powinna być równa sumie szerokości wkładek ustalających i wkładki ścinającej		

Średnia arytmetyczna otrzymanych pomiarów stanowi podstawę do obliczenia pola powierzchni przekroju poprzecznego. Prędkość przyrostu naprężenia w próbce nie powinna być większa niż 10 MPa/s. Próbę ścinania należy przeprowadzić w temperaturze  $20_{-10}^{+15}$  °C. Wytrzymałość na ścinanie wyznacza się ze wzoru (7):

$$R_t = \frac{P}{2 \cdot A_0} = \frac{2 \cdot P}{\pi d_0^2} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (7)$$

gdzie : P – jest to największa siła uzyskana w czasie próby ścinania [N],  
 $d_0$  – średnica badanej próbki [mm]



Rys.6. Przyrząd do przeprowadzenia próby ścinania siłami ściskającymi: 1- próbka, 2- śruby dociskowe, 3-korpus, 4- wkładka ścinająca, 5- wkładki ustalające

Średnia arytmetyczna otrzymanych pomiarów stanowi podstawę do obliczenia pola powierzchni przekroju poprzecznego. Prędkość przyrostu naprężenia w próbce nie powinna być większa niż 10 MPa/s. Próbę ścinania należy przeprowadzić w temperaturze  $20_{-10}^{+15}$  °C.

Wytrzymałość na ścinanie wyznacza się ze wzoru (7):

$$R_t = \frac{P}{2 \cdot A_0} = \frac{2 \cdot P}{\pi d_0^2} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (7)$$

gdzie : P – jest to największa siła uzyskana w czasie próby ścinania [N],

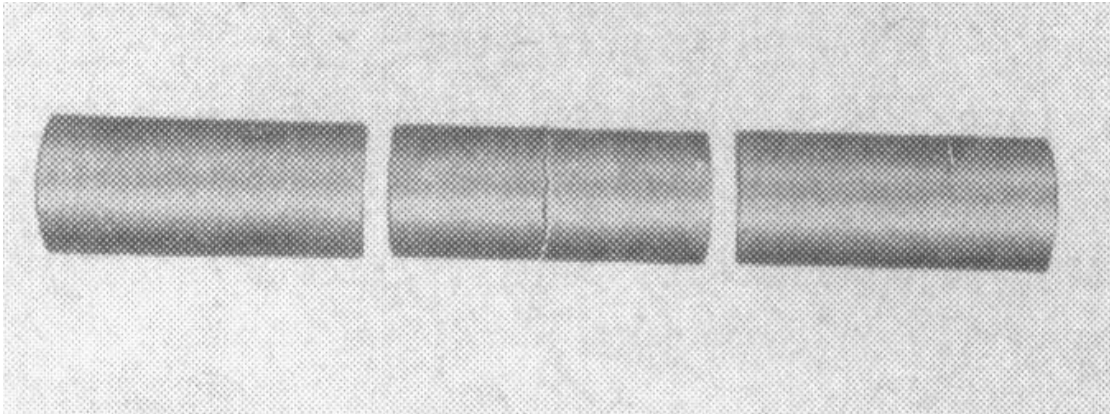
$d_0$  – średnica badanej próbki [mm]

Wzór (7) opiera się na założeniu równomiernego rozkładu naprężeń stycznych w ścinanych przekrojach i pominięciu naprężeń pochodzących od zginania. Założenie to jest w gruncie rzeczy bardzo odległe od rzeczywistości. Obliczoną w powyższy sposób wytrzymałość  $R_t$  należy traktować jako pewną wielkość umowną, porównawczą, dającą jedynie orientacyjną ocenę jakości badanego materiału a nie jego rzeczywistej wytrzymałości na czyste ścinanie.

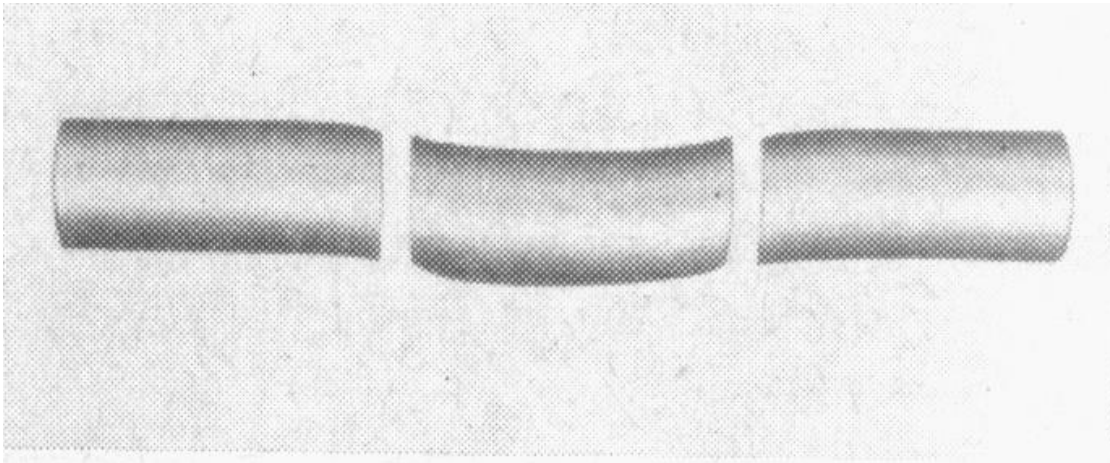
Naprężenia zginające są tym intensywniejsze, im większe są luzy między próbka a ścianami otworów w przyrządzie. Moment zginający powiększa się wraz ze wzrostem wymiarów a i b (rys.5b) i przyjmuje największą wartość w przekroju GH. W określonych warunkach, szczególnie podczas badania metali wykazujących stan kruchości prowadzi to do powstania pęknięcia w tym przekroju (rys.7). Pęknięcie to pojawia się jeszcze przed ścięciem



próbki. Próbki z materiałów sprężysto-plastycznych ulegają charakterystycznemu zgięciu oraz zgniotowi wskutek dużych nacisków, co poznaje się po pewnym spłaszczeniu próbki (rys.8). Stąd też wytrzymałość na technologiczne ścinanie określona wzorem (7) zależy nie tylko od własności wytrzymałościowych materiałów próbki, lecz jednocześnie od kształtu i wielkości przekroju oraz wymiarów przyrządu i dokładności przylegania próbki do jego otworów. Należy więc zachować dużą ostrożność w interpretowaniu i porównywaniu wyników uzyskanych w różnych warunkach.



Rys.7. Próbki dwucięte z materiału kruchego. Widoczne jest pęknięcie w środku próbki



Rys.8. Próbki dwucięte z materiału sprężysto-plastycznego

Wytrzymałość na ścinanie  $R_t$  określoną w opisany wyżej sposób można uważać za orientacyjny wskaźnik jakości materiału w połączeniach sworzniowych, nitowanych itp. Stosunek  $R_t$  do wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  może służyć do oceny stopnia zgodności doświadczenia z polecanymi do obliczeń konstrukcyjnych wartościami dopuszczalnego naprężenia tnącego  $k_t$  uzależnionego od  $k_r$ . Na podstawie wielu badań stwierdzono, iż wartość stosunku  $R_t/R_m$  dla różnych stali zawarty jest w przedziale  $0,7 \div 0,8$  a dla żeliwa szarego wynosi ok. 1,1.

#### 4. Przebieg ćwiczenia

- ♦ Przygotować protokół pomiarowy według podanego załącznika ( przed przystąpieniem do ćwiczenia)

- ◆ Narysować w protokóle schemat próby ścinania i zapisać dane dotyczące próbki ( materiał, wymiary). Średnicę  $d_0$  należy zmierzyć mikrometrem z dokładnością 0,01 mm,
- ◆ Ustalić zakres siłomierza maszyny wytrzymałościowej. Orientacyjną wartość siły niszczącej oblicza się z wzoru:

$$P = 2A_0 \cdot R_t = \frac{\pi d_0^2}{2} R_t \quad (8)$$

gdzie:  $R_t$  – jest to wytrzymałość na ścinanie w, przyjęta na podstawie tablic lub z zależności  $R_t = (0,7 \div 0,8) R_m$  dla stali oraz  $R_t = 1,1 R_m$  dla żeliwa szarego.

- ◆ Sprawdzić działanie urządzenia do próby ścinania
- ◆ Wstawić próbkę i poddać ją wzrastającemu obciążeniu aż do jej ścięcia. Zapisać w protokóle wartość obciążenia niszczącego
- ◆ Wykonać obliczenia  $R_t$  według wzoru (7) i naszkicować zniszczoną próbkę
- ◆ Zapisać w protokóle warunki w jakich została wykonana próba.

## 5. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

- ◆ Określenie celu próby
- ◆ Definicję wyznaczanej wielkości
- ◆ Protokół pomiarów
- ◆ Zestawienie wyników próby ścinania oraz wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  w postaci tablicy 2.

Tabela 2. Wytrzymałość na ścinanie i rozciąganie badanych materiałów

Numer próbki	Materiał	$R_t$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	Stosunek $R_t/R_m$

## 6. Dyskusja otrzymanych wyników

- ◆ Omówienie charakterystycznych własności badanych materiałów ujawnionych w próbie ścinania
- ◆ Ocena zależności między  $R_t$  i  $R_m$
- ◆ Uwagi i wnioski

Literatura:

1. Grudziński Karol: **Ćwiczenia laboratoryjne z Wytrzymałości Materiałów**. Politechnika Szczecińska. Szczecin 1972 r.
2. Kowalewski Zbigniew: **Ćwiczenia laboratoryjne z Wytrzymałości Materiałów**. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2000 r
3. Katarzyński Stefan, Kocańda Stanisław, Zakrzewski Marek: **Badanie własności mechanicznych metali**. WNT Warszawa 1969
4. PN-86/H-04321, Metale, próba ścinania

## Załącznik

## PROTOKÓŁ POMIARÓW

Schemat próby ścinania					
Wyniki pomiarów					
Nr próbki	Materiał	Średnica próbki	Pole przekroju	Obciążenie niszczące	Wytrzymałość na ścinanie
		$d_0$	$S_0$	F	$R_t = \frac{F}{2S_0}$
		mm	mm <sup>2</sup>	N	MPa
Warunki wykonania próby					
Zrywarka .....					
Zakres siłomierza .....					
Posuw roboczy p = .....mm/min					
Rysunek próbki po zniszczeniu i uwagi					
Data i podpis wykonującego ćwiczenie					