

## URZĄDZENIE DO PRÓB SKRĘCANIA ZE STATYCZNYM ROZCIĄGANIEM

MIROSLAW PIWECKI  
STEFAN JONIAK  
PIOTR WASILEWICZ

*Politechnika Poznańska*

### 1. Wstęp

W Instytucie Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej prowadzone są badania własności plastycznych austenitycznych stali kwasoodpornych podczas statycznych i dynamicznych obciążeń złożonych. Prace te objęte były problemem węzłowym 05.12, a obecnie przystępując do realizacji harmonogramu badań założono, że będą wykonywane próby statycznego i dynamicznego skręcania na próbkach rurkowych poddanych wstępnemu obciążeniu rozciągającemu.

Przyjęto że podczas dynamicznego obciążenia skręcającego maksymalna prędkość odkształcenia postaciowego będzie rzędu  $10^2 \text{ s}^{-1}$ .

W następnych punktach tego artykułu przedstawione zostaną szczegóły konstrukcyjne oraz wyniki testowania stanowiska zaprojektowanego do prób w wyżej podanym zakresie. Stanowisko to powstało na bazie własnego, wcześniej zbudowanego urządzenia do dynamicznego skręcania, które opisano w [1]. Wstępne informacje o zmodyfikowanym stanowisku podano w [2]. Przytoczone będą również obliczenia stanu naprężenia w próbce, oraz pierwsze wyniki badań.

### 2. Przegląd literatury

Literatura dotycząca prób w złożonych stanach naprężenia jest bardzo obszerna. Temat ten doczekał się szeregu opracowań syntetycznych, z których wymienić można monografie [3] i [4]. Wykonanie badań dynamicznych w złożonym stanie naprężeń wymaga budowy odpowiednich stanowisk badawczych, a w przypadku dużych prędkości odkształceń — również zastosowania zaawansowanej techniki pomiarowej. Poniżej omówione zostaną skrótowo urządzenia do prób skręcania z rozciąganiem, należące do następujących grup:

- a) stanowiska, w których wszystkie składowe obciążenia mają charakter dynamiczny,
- b) stanowiska, w których tylko jedna składowa obciążenia ma charakter dynamiczny, a druga — statyczny.

Zwiewzły opis urządzeń należących do grupy a) rozpocznijmy od konstrukcji U. S. Lindholma i L. M. Yeakley'a [5], umożliwiającej jednoczesne skręcanie z rozciąganiem realizowane przy pomocy urządzenia pneumatycznego. W urządzeniu H. Fukuoki i T. Masui [6] dynamiczne rozciąganie uzyskiwano za pomocą ciężaru opadającego na płytę przymocowaną do próbki, a udar skrętny wywierał młot wahadłowy uderzający w występ płyty. W pracy [7] opisano sposób realizacji dynamicznego skręcania i rozciągania w chwili wyzwolenia energii sprężystej zmagazynowanej we wstępnie skręconym i rozciągniętym pręcie połączonym z próbką.

Stanowiska, w których tylko jedna składowa obciążenia ma charakter dynamiczny bazują często na zasadzie pręta Hopkinsona. A. Hojo i A. Chatani opisali [8] takie właśnie rozwiązanie problemu — skrętny pręt Hopkinsona uzupełniono o naciąg śrubowy do wywierania siły osiowej. Impuls skrętny uzyskiwano za pomocą ciężaru opadającego na dźwignię połączoną z prętem. Z kolei w pracy [9] znajdujemy opis urządzenia, w którym klasyczny układ Hopkinsona zaopatrzone w odpowiedni naciąg linowy do wywierania statycznego momentu skręcającego.

Bardzo interesujące rozwiązanie konstrukcyjne stanowiska do prób quasi-statycznych opracowali autorzy pracy [10]. W zakresie prędkości odkształceń od  $10^{-4}$  do  $10^{-1}$  s $^{-1}$  daje ona możliwość osiowego rozciągania z jednoczesnym skręcaniem próbki. Istotnym elementem jest tutaj łożysko śrubowe, przez które przekazywany jest moment skręcający, a jednocześnie jego obrót wywiera siłę osiową.

Integralną częścią każdego stanowiska jest próbka. W przypadku cienkościennych próbek rurkowych istotny jest iloraz grubości ścianki  $t$  i średnicy zewnętrznej  $D_z$  na odcinku pomiarowym. Wartości  $t/D_z$  przyjęte przez różnych autorów podano w tabelicy 1. Tamże przytoczono wartości ilorazu długości pomiarowej  $l_0$  i średnicy zewnętrznej, który pozwala w pewnym stopniu oszacować równomierność rozkładu naprężenia na długości pomiarowej, a także skłonność do utraty stateczności podczas skręcania powłoki, jaką jest cienkościenna próbka.

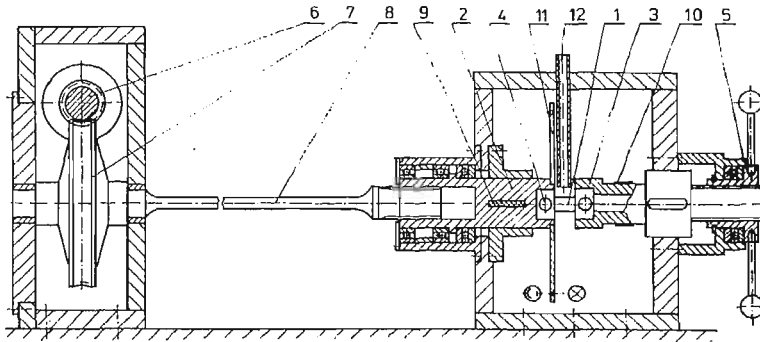
Tablica 1. Charakterystyczne parametry próbek według różnych autorów

Lp.	$t/D_z$	$l_0/D_z$	Literatura
1	0,0312	2,50	[5]
2	0,0375	71,9	[6]
3	0,0500	0,714	[8]
4	0,0526	1,58	[10]
5	0,0556	0,556	[7]
6	0,0556	0,278	[11]
7	0,0714	0,714	[10]

Jak wynika z tablicy, iloraz  $t/D_z$  mieści się w przedziale od 0,03 do 0,07, natomiast  $l_0/D_z$  przyjmuje rozmaite wartości zależnie od przeznaczenia próbki w poszczególnych badaniach.

### 3. Własne stanowisko badawcze

Na rysunku 1 pokazano budowę własnego stanowiska do statycznego i dynamicznego skręcania ze wstępnym statycznym rozciąganiem próbki. Cienkościennej próbki rurkowej



Rys. 1. Stanowisko badawcze

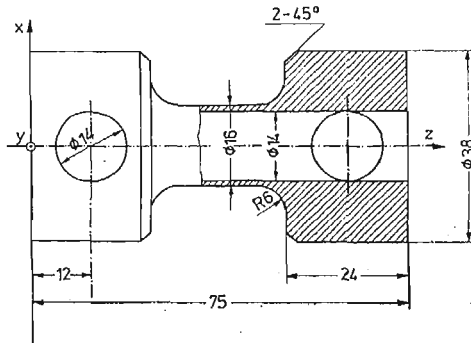
1 jest mocowana w gniazdach uchwytów 2 i 3 za pomocą sworzni 4. Uchwyt 2 jest łożyskowany obrotowo, nieprzesuwnie za pomocą dwu łożysk kulkowych poprzecznych i jednego łożyska wzdłużnego. Pokręcając nakrętkę 5 osadzoną na gwincie śruby tworzącej całość z uchwytem 3, dzięki suwliwemu łożyskowaniu uchwytu w korpusie, wywołuje się w próbce statyczny naciąg. Źródłem energii skręcającej próbkę jest drążek skrętny 8 z duralu PA9, połączony za pomocą wielowypustu z uchwytem 2 unieruchomionym przez zatyczkę 9 wykonaną z metapleksu. Ślimak 6 powoduje obrót ślimacznicy 7 i skręcenie drążka 8. Zgromadzona w nim energia sprężysta zostaje uderowo przekazana na próbkę w chwili ścięcia zatyczki. Próby statycznego skręcania wykonuje się bez zatyczki 9. Moment skręcający przenoszony przez próbkę jest mierzony za pomocą dwóch rozet tensometrycznych prostokątnych 10 naklejonych na rurowej części uchwytu 3 i tworzących układ pełnomostkowy. Inne dwie rozety prostokątne, połączone również w pełny mostek, mierzą siłę osiową.

Do pomiaru kąta skręcenia służy zestaw składający się z fotodiody, żarówki i tarczy 11 z 300 otworami wykonanymi na odpowiednio dobranej średnicy. Zasada pomiaru kąta skręcenia została szerzej opisana w pracy [1]. Układ pomiarowy uzupełnia mostek tensometryczny M1000 firmy Mikrotechna i oscyloskop czterokanałowy typu DB 510 A produkcji Radiotechniki. Zastosowany układ umożliwia wyznaczenie prędkości odkształcenia postaciowego próbki podczas skręcania oraz konstrukcję wykresu skręcania, a także kontrolę wartości siły rozciągającej. Nanosząc uprzednio rysy na powierzchni próbek, można zmierzyć ich trwałe odkształcenia po odjęciu obciążenia. Zaznaczyć należy, że pomiar kąta skręcenia za pomocą opisanej wyżej tarczy z otworami prowadzi do pewnego

błędu przy obliczeniu odkształcenia postaciowego, co jest związane z nieznajomością dokładnej wartości długości efektywnej próbki, która obejmuje oprócz długości roboczej również pewną część strefy przejściowej o promieniu R6. Długość efektywną rozumiemy podobnie jak w zakresie sprężystym (patrz p. 4). Długość ta zależy od geometrii próbki oraz od stałych materiałowych. Podczas badań w obniżonych temperaturach płyn chłodzący doprowadza się do próbki ze zbiornika, w którym temperatura jest stabilizowana z dokładnością  $\pm 0,5^\circ \text{C}$ . Na powierzchnię zewnętrzną ciecz chłodząca spływa przewodem gumowym 12. Ze względu na cienkościenność przyjęto, że w całej odkształcanej objętości panuje stała temperatura.

#### 4. Stan naprężeń w próbce

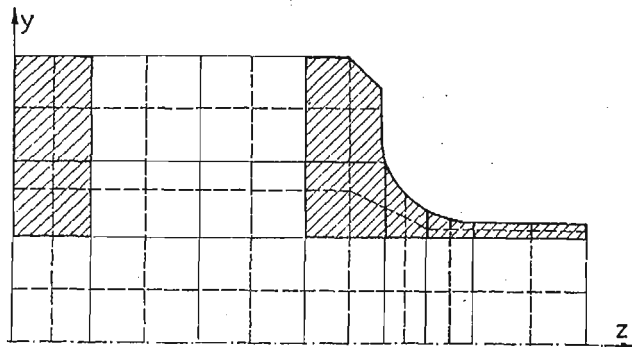
Kształt i wymiary próbki przystosowanej do wyżej opisanego stanowiska pokazano na rysunku 2. Jest to cienkościenna próbka rurkowa, dla której  $t/D_z = 0,0625$ , a  $l_0/D_z =$



Rys. 2. Kształt próbki

$= 0,938$ . Wartości tych ilorazów są zbliżone do podawanych w literaturze. Rurkowa część próbki przechodzi w masywne części chwytowe z otworami na sworznie.

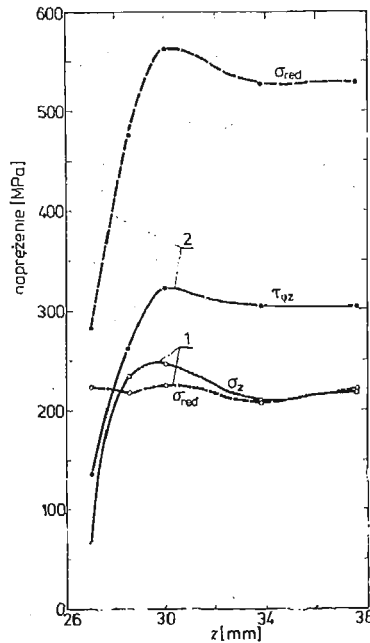
Podczas badań próbka podlega dwom rodzajom obciążeń, a mianowicie rozciąganiu i skręcaniu. W każdym z tych przypadków jednorodny stan naprężenia panujący pośrodku



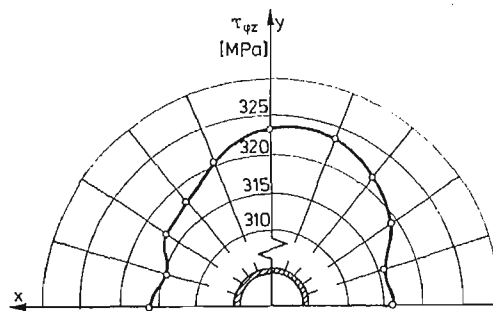
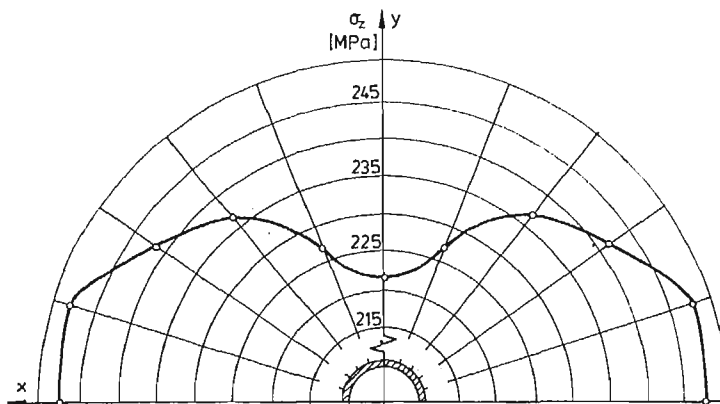
Rys. 3. Podział próbki do obliczeń metodą elementów skończonych (w płaszczyźnie  $x = 0$ )

długości pomiarowej zostaje zaburzony w okolicach części chwytowych wskutek zmiany kształtu. Wpływ na rozkład naprężeń w próbce ma również sposób przyłożenia obciążenia za pomocą sworzni. W celu uzyskania informacji o rozkładach naprężeń w próbce, wykonano obliczenia metodą elementów skończonych, bazując na systemie SESAM-69, w ramach którego program o symbolu NV333J umożliwia analizę statyczną trójwymiarowego stanu naprężenia [12]. Wykonano oddzielnie obliczenia na rozciąganie i skręcanie, przyjmując każdorazowo do obliczeń ćwiartkę próbki i dzieląc ją na 51 elementów (rysunek 3). W obliczeniach przyjęto odpowiednie warunki brzegowe wynikające z symetrii i antysymetrii. Założono również, że naciski sworzni na otwór są stałe wzdłuż osi  $y$ , a dla ustalonego  $y$  zmieniają się proporcjonalnie do wartości funkcji cosinus. W obliczeniach na skręcanie przyjęto obciążenie o zwrocie zgodnym z osią  $x$ .

Najważniejsze wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 4, 5 i 6 dla wartości momentu skręcającego  $M_x = 100 \text{ Nm}$  i siły osiowej  $F_z = 10 \text{ kN}$ . Jak widać, maksymalne spiętrzenie naprężeń występuje dla współrzędnej  $z = 30 \text{ mm}$ , czyli w miejscu gdzie kończy się łuk R6, a rozpoczyna część rurowa próbki. Współczynnik kształtu dla naprężeń  $\tau_{\varphi z}$  w przypadku skręcania, uzyskany po wykorzystaniu rezultatów obliczeń metodą elementów skończonych wynosi 1,086. Współczynnik kształtu dla naprężeń  $\sigma_z$  z obliczeń na rozciąganie wynosi 1,167. Z rysunku 5 wynika, że podczas skręcania maksymalne wartości naprężeń występują w płaszczyźnie  $x = 0$ , choć należy zauważyć, że nierównomierność rozkładu naprężeń  $\tau_{\varphi z}$  na obwodzie jest niewielka i wynosi około 2%. Efekt ten utrzymuje się na długości pomiarowej próbki.



Rys. 4. Rozkłady najważniejszych składowych tensora naprężenia i naprężeń zredukowanych wzdłuż osi  $z$  na powierzchni próbki uzyskane z obliczeń na: 1 — rozciąganie ( $y = 0$ ), 2 — skręcanie ( $x = 0$ )

Rys. 5. Rozkład naprężeń  $\tau_{qz}$  na obwodzie próbki dla  $z = 30$  mmRys. 6. Rozkład naprężeń  $\sigma_z$  na obwodzie próbki dla  $z = 30$  mm

W przypadku rozciągania maksymalne naprężenia  $\sigma_z$  występują każdorazowo w przekroju  $y = 0$ , a maksymalna nierównomierność ich rozkładu na obwodzie próbki wynosi około 10% dla  $z = 30$  mm (rysunek 6). Występowanie maksymalnych naprężeń  $\tau_{qz}$  w płaszczyźnie  $x = 0$  podczas skręcania, oraz maksimum  $\sigma_z$  w płaszczyźnie  $y = 0$  podczas rozciągania można wytłumaczyć zagęszczeniem trajektorii naprężeń wywołanym obecnością otworu na sworzeń w części chwytowej próbki.

W zakresie odkształceń plastycznych należy się spodziewać wyrównania poziomów naprężeń.

Wykorzystując przytoczone powyżej wyniki obliczeń podamy jeszcze „długość efektywną” próbki w zakresie sprężystym, zdefiniowaną jako długość  $l_e$  odcinka obejmującego część roboczą i pewien fragment próbki o promieniu R6, przy czym:

$$\gamma = \frac{\alpha R}{l_e}, \quad (1)$$

gdzie:  $\alpha$  — kąt obrotu części chwytowej obliczony metodą elementów skończonych dla przyłożonej wartości  $M_z$ ,

$\gamma$  — kąt odkształcenia postaciowego na środku długości roboczej,

$R$  — promień zewnętrzny na długości roboczej.

Wartość  $\gamma$  oblicza się ze wzoru

$$\gamma = \frac{M_z}{W_0 \cdot G}, \quad (2)$$

gdzie:  $G$  — moduł na ścinanie,

$W_0$  — wskaźnik wytrzymałości na skręcanie.

Dla przyjętej geometrii próbki oraz  $G = 0,8077 \cdot 10^5$  MPa uzyskano  $l_e = 22,60$  mm, którą to wartość należy podstawić do wzoru (1), aby uzyskać  $\gamma$  na długości roboczej, znając kąt obrotu.

### 5. Skłonność próbki do utraty stateczności

Próbka podczas skręcania z rozciąganiem osiąga stan sprężysto-plastyczny. Ponieważ jest ona cienkościenną powłoką, więc grozi jej w tych warunkach utrata stateczności. Na podstawie zawartych w literaturze rozwiązań stateczności powłoki walcowej skręcanej w zakresie sprężysto-plastycznym, można wyznaczyć wartość obciążenia powodującego utratę stateczności. Rozwiązanie takie cytują w postaci wykresu E. I. Grigoluk i W. W. Kabanow [13]. Zgodnie z tym rozwiązaniem krytyczny moment skręcający wynosi

$$M_{kr} = T^* \frac{\pi R_s t (4R_s^2 + t^2)}{2R_s + t}, \quad (3)$$

gdzie:  $T^*$  — wielkość o wymiarze naprężenia według [13],

$R_s$  — średni promień powłoki,

$t$  — grubość ścianki.

Po podstawieniu danych uzyskano  $M_{kr} = 119$  Nm. Nie natrafiono w literaturze na rozwiązanie podobnego zagadnienia stateczności przy równoczesnym skręcaniu i rozciąganiu. W związku z tym, do oceny wpływu siły rozciągającej na wartość krytycznego momentu skręcającego wykorzystano rozwiązanie w zakresie sprężystym zawarte w [14], przyjmując zgodnie z zleceniami literatury [15] moduł sieczny  $E_s$  zamiast modułu Younga  $E$  oraz liczbę Poissona  $\nu = 0,5$ . Rozwiązanie to ma postać ogólną

$$M_{kr} = AE_s + BF_z, \quad (4)$$

gdzie:  $A, B$  — współczynniki zawierające wymiary powłoki, parametry kształtu po utracie stateczności i liczbę Poissona.

$F_z$  — siła osiowa.

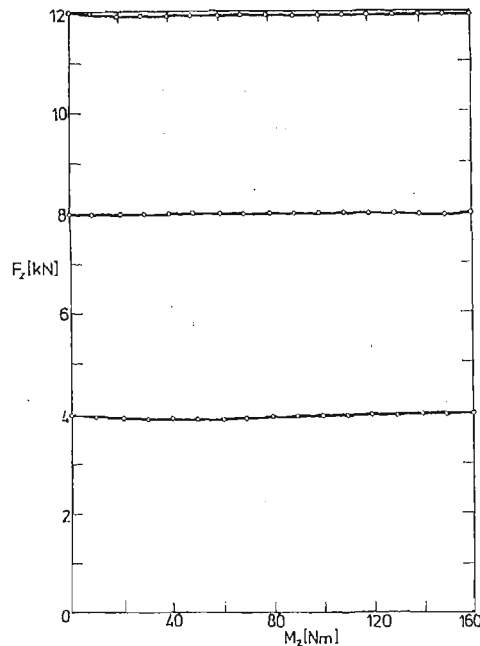
Rozwiązanie powyższe ma charakter jakościowy, gdyż dopiero przy odkształceniach trwałych około 0,024 i module  $E_s = 2 \cdot 10^4$  MPa daje wartości realne. Ważniejsze jest tu wyjaśnienie wpływu siły osiowej  $F_z$  na wartość momentu krytycznego. Obecność siły zwiększa odporność próbki na utratę stateczności, przy czym wartość drugiego członu we wzorze (4) praktycznie się nie zmienia przy stałej sile. Przykładowo dla  $F_z = 10$  kN, gdy  $E_s$  maleje od wartości równej  $E$  do  $2 \cdot 10^4$  MPa, to iloraz  $BF_z/AE_s$  zmienia się w przedziale od 0,01 do 0,1. Podobnie dla  $F_z = 16$  kN otrzymano wartości tego ilorazu od 0,02 do 0,17.

## 6. Testowanie stanowiska

Testowanie stanowiska rozpoczęto od wyznaczenia charakterystyk siłomierza oddzielnie podczas obciążenia momentem skręcającym i obciążenia siłą osiową.

Stwierdzono liniowość jego wskazań w szerokich przedziałach  $M_z$  i  $F_z$ .

Ważnym problemem było zbadanie, czy wzrost momentu skręcającego nie powoduje zmiany siły osiowej wywieranej za pomocą nakrętki 5 (rysunek 1). Wyniki trzech wykonanych w tym zakresie pomiarów dla przypadku połączenia uchwytów 2 i 3 sztywnym wałkiem w miejsce cienkościennej próbki, zilustrowano na rysunku 7. Wynika z niego że



Rys. 7. Zależność siły osiowej od narastającego momentu skręcającego

w stanowisku nie ma praktycznie sprzężenia między obciążeniem skręcającym i siłą osiową tak długo dopóki próbka nie odkształca się trwale w kierunku osiowym. Odkształcenie plastyczne próbki powoduje spadek siły osiowej co można zaobserwować na oscylogramach dynamicznego skręcania ze wstępnie przyłożoną siłą osiową. Omówienie oscylogramów uzyskiwanych przy zastosowaniu wyżej opisanego układu pomiarowego znaleźć można w pracy [1]. Z oscylogramów wyznaczono czas zniszczenia próbki podczas prób dynamicznych, który wynosił 3 do 4 ms, oraz prędkość odkształcenia postaciowego podczas próby. W początkowym stadium odkształcenia prędkość zmienia się w przedziale od  $0,7 \cdot 10^2$  do  $10^2 \text{ s}^{-1}$ , by później utrzymywać wartość stałą. Poniżej wykazemy, że próby na omawianym stanowisku mogą być traktowane od strony pomiarowej jako quasi-statyczne. Analizę tego zagadnienia zawiera praca J. Klepaczki [16]. Zaliczenie próby do rodzaju quasi-statycznych wymaga spełnienia dwóch warunków:



- a) czas propagacji fali ścinania na drodze próbka-czujniki tensometryczne jest dużo krótszy od czasu próby,  
 b) pomiarowy przetwornik tensometryczny ma dużą częstotliwość i małą amplitudę drgań własnych.

Warunek b) jest spełniony, co potwierdziły oscylogramy. Obliczmy teraz czas propagacji fali ścinania na drodze próbka-czujniki tensometryczne, zakładając że w próbce propaguje się fala plastyczna, a w uchwycie z czujnikami — fala sprężysta.

Czas ten oszacujemy na podstawie wzoru

$$t = l_1 \sqrt{\frac{g}{d\tau}} + l_2 \sqrt{\frac{g}{G}}, \quad (5)$$

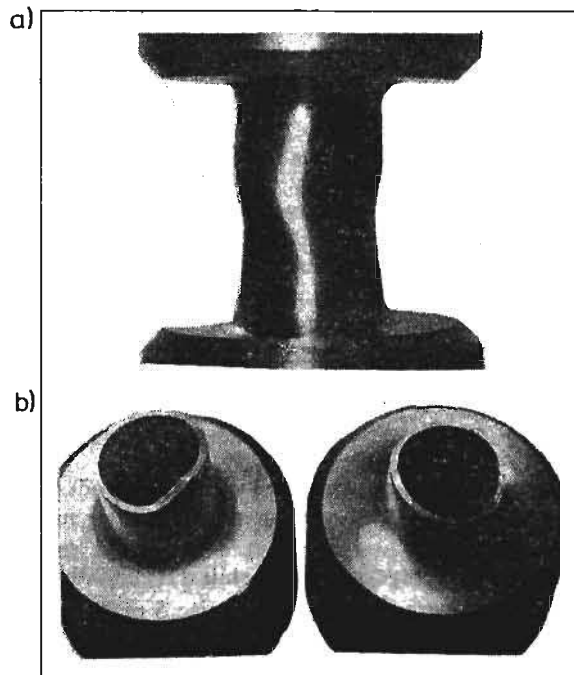
gdzie:  $l_1 = 0,015$  m — długość robocza próbki (rysunek 2),

$l_2 = 0,054$  m — długość od czoła uchwytu nieruchomego 3 do miejsca naklejenia czujników tensometrycznych 10 (rysunek 1),

$g = 7850$  kg/m<sup>3</sup> — gęstość stali,

$G = 8,8 \cdot 10^4$  MPa — moduł na ścinanie dla stali,

$\frac{d\tau}{dy} = 0,02 G$  — pochodna naprężenia stycznego względem odkształcenia postaciowego, której wartość przyjęto dla zaawansowanego odkształcenia plastycznego.



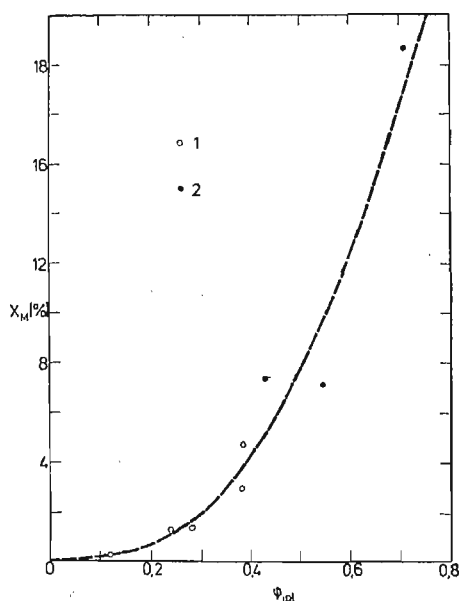
Rys. 8. Formy zniszczenia próbek: a) — po utracie stateczności, b) — złom na długości roboczej

Po podstawieniu wartości liczbowych uzyskano  $t = 0,048$  ms, to jest wartość od 60 do 80 razy mniejszą od czasu zniszczenia próbki, co prowadzi do wniosku, że próby mają charakter quasi-statyczny z pomiarowego punktu widzenia.

Na zakończenie tej części podamy parę uwag na temat form zniszczenia próbek pokazanych na rysunku 8. Przypadki uzyskania złomu podczas realizacji programu badań występują rzadko, gdyż przeważnie próbę przerywa się po osiągnięciu założonych odkształceń. Pewne utrudnienie badań polega na tym, że przyłożenie zbyt małej siły osiowej może doprowadzić do utraty stateczności próbki podczas skręcania. Doświadczenia potwierdziły słuszność przytoczonych w punkcie 5 rozważań na temat wpływu siły osiowej  $F_z$  na wartość obciążenia krytycznego. Również wartość krytycznego momentu skręcającego około 120 Nm jest dobrym dolnym oszacowaniem tej wielkości w temperaturze otoczenia.

### 7. Odkształcenia plastyczne austenitycznych stali kwasoodpornych

Opisane stanowisko wykorzystano do badania metastabilnych austenitycznych stali kwasoodpornych. Jak wiadomo, w stalach tych pod wpływem odkształcenia plastycznego zachodzi przemiana martenzytyczna. Na rysunku 9 pokazano zależność ilości martenzytu



Rys. 9. Zależność udziału objętościowego martenzytu od intensywności odkształceń plastycznych dla stali 1H18N9 w temperaturze 0°C. 1—rozciganie, 2—złożony stan naprężenia

od intensywności odkształceń plastycznych dla stali 1H18N9 badanej statycznie w temperaturze 0°C. Punkty pomiarowe uzyskano wykonując 5 prób rozciągania i 3 w złożonym stanie naprężenia. Te ostatnie realizowano w ten sposób, że utrzymywano stałą wartość siły osiowej podczas narastania momentu skręcającego. Po odkształceniu, ze środka części rurkowej wycinano dwie próbki do pomiaru metodą magnetyczną udziału obję-

tościowego martenzytu. Intensywność odkształceń wyznaczono mierząc przemieszczenia końców odcinka pomiarowego naniesionego na rurkowej części próbki. Linię przerywaną widoczną na wykresie wyliczono bazując na zależności podanej przez D. C. Ludwigsona i J. A. Bergera [17].

Przytoczone w tym punkcie informacje należy traktować jako komunikat o badaniach, których pełne rezultaty zostaną opublikowane w terminie późniejszym.

## 8. Podsumowanie

W pracy przedstawiono opis stanowiska umożliwiającego wykonanie prób statycznego i dynamicznego skręcania ze wstępnym statycznym rozciąganiem próbki. Uzyskano zakładaną prędkość odkształcenia postaciowego rzędu  $10^2 \text{ s}^{-1}$ . Wykazano, że próby można traktować od strony pomiarowej jako quasi-statyczne.

Zaprojektowano cienkościenną próbkę rurkową. Wykonano obliczenie rozkładów naprężeń w próbce metodą elementów skończonych. Obliczono współczynniki kształtu dla przyjętej geometrii próbki oraz zbadano równomierność rozkładów naprężeń na długości roboczej. Stwierdzono, że niewielka koncentracja naprężeń w okolicach części chwytowych nie powoduje występowania złomu próbek w tych miejscach. W pracy podano informacje o wpływie sworzniowego połączenia próbki z uchwytami na rozkłady naprężeń. Przeanalizowano również warunki utraty stateczności przez próbkę obciążoną momentem skręcającym i siłą osiową w zakresie sprężysto-plastycznym.

W artykule przytoczono wyniki pierwszych badań nad wpływem odkształceń plastycznych w złożonych stanach naprężeń na odkształceniową przemianę austenitu w stali nierdzewnej.

## Literatura

1. M. PIWECKI, *Próby statycznego i dynamicznego skręcania w zastosowaniu do oceny zdolności do odkształceń twardych stali*, Mechanika Teoretyczna i Stosowana, 18 (1980), 3, str. 371 - 381.
2. M. PIWECKI, S. JONIAK, P. WASILEWICZ, *Konstrukcja i testowanie stanowiska do dynamicznego skręcania ze wstępnym statycznym rozciąganiem próbki*, XI Sympozjum Dośw. Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1984, Cz. 1, str. 292 - 295.
3. *Mechanika techniczna tom X, Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego*, pod red. W. Szczepińskiego, PWN, Warszawa 1984.
4. N. N. MALININ, J. RZYSKO, *Mechanika materiałów*, PWN, Warszawa 1981.
5. U. S. LINDHOLM, L. M. YEAKLEY, *A Dynamic Biaxial Testing Machine*, Proceedings SESA, 24 (1967), 1, str. 1 - 7.
6. H. FUKUOKA, T. MASUI, *Incremental Impact Loading of Plastically Prestressed Aluminum by Combined Tension-Torsion Load*, Bulletin JSME, 18 (1975), 116, str. 104 - 103.
7. T. HAYASHI, N. TANIMOTU, *Behavior of Aluminum Simultaneously Subjected to Dynamic Combined Stresses of Torsion and Tension*, 19<sup>th</sup> Japan Congress on Materials Research „Metallic Materials” March 1976, str. 53 - 56.
8. A. HOJO, A. CHATANI, *On the Dynamic Yield Condition under Combined Loading of Dynamic Torsion and Static Tension*, Bulletin JSME, 21 (1978), 157, str. 1064 - 1070.
9. J. LIPKIN, R. J. CLIFTON, *Plastic Waves of Combined Stresses Due to Longitudinal Impact of a Pretorqued Tube*, Part 1: Experimental Results, Journal of Applied Mechanics, 37 (1970), 4, str. 1107 - 1112.

10. A. HOJO, A. CHATANI, *On the Dynamic Stress-Strain Relations under the Combined Loading of Tension and Torsion*, Bulletin JSME, 22 (1979), 166, str. 469 - 475.
11. K. OSAKADA, A. WATADANI, *Ductile Fracture of Carbon Steel under Cold Metal Forming Conditions*, Bulletin JSME, 20(1977), 150, str. 1557 - 1565.
12. *Instrukcja użytkowania programu System SESAM 69, NV333J, „Analiza statyczna trójwymiarowego stanu naprężeń”*, Centrum Techniki Okrętowej, Gdańsk 1974.
13. Э. И. Григolloк, В. В. Клянов, *Устойчивость оболочек*, Наука, Москва 1978.
14. А. С. Авдонин, *Прикладные методы расчёта оболочек и тонкостенных конструкций*, Машиностроение, Москва 1969.
15. *Справочник „Прочность, устойчивость, колебания”*, Машиностроение, Москва 1968.
16. J. KLEPACZKO, *Urządzenie do dynamicznego skręcania*, Mechanika Teoret. Stosowana, 5 (1967), 4, str. 425 - 438.
17. D. C. LUDWIGSON, J. A. BERGER, *Plastic Behaviour of Metastable Austenitic Stainless Steels*, Journal Iron Steel Inst. 207 (1969), str. 63 - 69.

### Резюме

#### УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА КРУЧЕНИЕ СО СТАТИЧЕСКИМ РАСТЯЖЕНИЕМ

В статье дано описание устройства для статических и динамических испытаний на кручение со статическим растяжением тонкостенного образца. С использованием метода конечных элементов анализировано состояния напряжений в образце. Статья содержит замечания на тему упруго-пластической устойчивости образца во время испытаний на кручение с растяжением.

В конце статьи представлено первые результаты испытаний деформационного превращения аустенита в нержавеющую стали.

### Summary

#### APPARATUS FOR TORSION TESTS WITH STATIC TENSION

In the paper an apparatus for static and dynamic torsion tests with static tension of a thin-walled specimen is described. With the use of finite element method the states of stresses in the specimen have been analysed. The paper contains remarks on elastic-plastic stability of the specimen during torsion tests with tension.

At the end of the paper some experimental results of strain-induced austenite transformation in a stainless steel are presented.

*Praca wpłynęła do Redakcji dnia 18 kwietnia 1985 roku.*