

METODYKA STATYCZNYCH BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH  
PLASTYCZNEGO PŁYNIĘCIA METALI

JÓZEF MIASTKOWSKI (WARSZAWA)

1. Wprowadzenie

Rzeczywiste warunki pracy elementów konstrukcyjnych charakteryzują się dużą różnorodnością. Znaczna część detali urządzeń i konstrukcji pracuje w warunkach przestrzennego lub płaskiego stanu naprężenia. Znajomość własności materiału, określonych w warunkach jednoosiowego stanu naprężenia, jest często niewystarczająca przy obliczeniach wytrzymałościowych takich elementów. Dlatego też, aktualnym zadaniem mechaniki ciała stałego są badania własności materiałów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych i badania zmian tych własności pod wpływem zmiennych warunków pracy.

Istniejące teorie plastyczności mają na ogół dobre potwierdzenie doświadczalne w opisie zachowania metali w warunkach złożonego stanu naprężenia przy proporcjonalnych obciążeniach. Teorie te są jednak niewystarczające do opisu praw plastycznego płynięcia tych metali przy złożonych obciążeniach. Wynika to z niedostatecznego uwzględnienia anizotropii własności mechanicznych, pojawiających się w wyniku odkształceń plastycznych. Dla zbudowania podstaw teorii plastyczności ciała anizotropowego niezbędne jest nagromadzenie odpowiedniego materiału doświadczalnego. Realizacja tego celu wymaga bardziej udoskonalonej techniki badawczej, stosowania urządzeń i przyrządów pozwalających na realizację różnorodnych programów obciążania lub odkształcania przy złożonych stanach naprężenia. Wyższe wymagania odnoszą się również do dokładności pomiarów obciążeń i odkształceń.

W pracy omówiono metody badań doświadczalnych metali odkształcanych plastycznie różnymi sposobami obciążenia w warunkach złożonego stanu naprężenia. Zwrócono uwagę na rozmaite formy przedstawiania wyników badań i ich interpretację.

Łatwo zauważyć, że brak jest w pracy omówienia podstawowych metod badania własności mechanicznych metali. Wynika on stąd, że zagadnienia te są obszernie opisane w licznych opracowaniach książkowych. Można je znaleźć, między innymi, w monografiach: KATARZYŃSKIEGO, KOCAŃDY i ZAKRZEWSKIEGO [1] oraz SIEMUSZKINA [28].

2. Definicja granicy plastycznego płynięcia

Ważnym czynnikiem przyspieszającym rozwój teorii plastycznego płynięcia — opartej na założeniu istnienia potencjału plastycznego — uwzględniającej wzmocnienie materiału, są badania doświadczalne powierzchni plastyczności. Przy wyznaczaniu tych powierzchni istotną rolę odgrywa wybór kryterium uplastycznienia, z którym związane są poważne trudności. Brak ścisłej definicji granicy plastyczności doprowadził do dużej swobody w określaniu powierzchni płynięcia przez różnych autorów. Jedni, powierzchnię utożsamiają z granicą proporcjonalności, inni — z granicą sprężystości. Znaczna część badaczy określa granicę płynięcia jako naprężenia odpowiadające danej wartości odkształceń plastycznych, przy czym i tu również brak jednolitego podejścia. Niektórzy przyjmują małe wartości odkształceń plastycznych (np. 0,01% czy 0,02%), inni poczynając od 0,02%

aż do 0,2%, a nawet 0,5%. W pracy TAYLORA, QUINNEYA [2] przez część wykresu obciążenie–odkształcenie, odpowiadającą dużym odkształceniom plastycznym, prowadzono linię prostą, której przecięcie z osią obciążeń wyznaczało wartość granicy plastyczności. Możliwe jest również przyjmowanie za granicę płynięcia punktu przecięcia dwóch prostych, przy czym jedna z nich jest przedłużeniem zakresu sprężystego, a druga przechodzi przez część wykresu odpowiadającą, podobnie jak w poprzednim sposobie, dużym odkształceniom plastycznym [3]. Spotyka się również metodę, w której za granicę plastyczności przyjmuje się punkt zetknięcia z krzywą obciążenie–odkształcenie stycznej o module mniejszym od modułu sprężystego. Metoda ta ma tę wadę, że w zależności od charakteru krzywej naprężenia–odkształcenia punkt styczności określa inną wartość odkształcenia trwałego, i to tym większą, im łagodniejsze jest zakrzywienie wykresu za obszarem sprężystym.

Brak jednolitego kryterium wyznaczania granicy plastyczności powoduje, że wyników wielu prac doświadczalnych nie można z sobą porównywać. Przyjęcie jednolitego sposobu określania granicy plastyczności pozwoliłoby wyeliminować te trudności. KACZANOW [29, 30] proponuje wyznaczanie granicy plastyczności metodą siecznej. W metodzie tej początkowo wyznacza się dwie granice plastyczności dla dwóch sąsiednich, dostatecznie dużych wartości odkształcenia plastycznego, np.  $\sigma_{0,1}$  i  $\sigma_{0,2}$  dla  $\Delta\epsilon_1 = 0,1\%$  i  $\Delta\epsilon_2 = 0,2\%$ . Następnie «rzeczywista» granica płynięcia określona zostaje na drodze geometrycznej lub analitycznej ekstrapolacji do zerowej wartości odkształcenia trwałego. Najbardziej prosta jest ekstrapolacja liniowa, dla której «rzeczywista» wartość granicy płynięcia wyraża się zależnością

$$(1) \quad \sigma_{0,0} = \frac{\sigma_{0,1}\Delta\epsilon_2 - \sigma_{0,2}\Delta\epsilon_1}{\Delta\epsilon_2 - \Delta\epsilon_1}.$$

Wydaje się, że do czasu rozstrzygnięcia tej kwestii słuszne jest podawanie wyników badań doświadczalnych dla całej rodziny powierzchni plastyczności. Na przykład, w pracach [8, 9, 12, 25, 26, 27] wyznaczane są powierzchnie dla granicy proporcjonalności oraz dla odkształceń trwałych  $\epsilon_{pl} = 0,01\%$ ,  $0,02\%$ ,  $0,1\%$ ,  $0,2\%$ ,  $0,3\%$ ,  $0,4\%$  i  $0,5\%$ .

### 3. Badanie plastycznego płynięcia metali przy prostych rodzajach obciążenia

Podstawową próbą badania mechanicznych własności metali jest próba jednoosiowego rozciągania. Oprócz niej stosowane są próby ściskania okrągłych próbek cylindrycznych pełnych oraz skręcanie próbek w postaci cienkościennych rurek. Metodyka tych badań jest znana i opisywana w obszernych monografiach, np. [1, 28], natomiast wymagają omówienia pewne specjalne metody odkształcania próbek. Jedną z nich jest próba odkształcania z dużymi deformacjami, podana przez ERBELA w pracy [4]. W metodzie tej badania przeprowadzane są na próbkach w postaci cienkiego pierścienia umieszczonego między dwoma dociskany mi siłą osiową stemplami. Pierścień zewnętrzny, w którym umieszczona jest próbka, i trzpień wewnątrz próbki zapobiegają wyływowi materiału w kierunku promieniowym na zewnątrz i do środka. Aby zapobiec ślizganiu stempli po próbce podczas skręcania, powierzchnie czołowe stempli mają specjalne nacięcia. W pierwszej fazie próby stemple obciążane są znaczną siłą osiową, wywołującą w próbce ciśnienie hydrostatyczne. Następnie stemple zostają obracane względem siebie wokół wspólnej osi. W ten sposób otrzymuje się zależność momentu skręcającego od kąta skręcania. Przy

odpowiednim doborze ciśnienia uzyskiwane są bardzo duże odkształcenia próbki, dochodzące do kilku tysięcy procent.

Inna metoda, za pomocą której można również uzyskiwać duże deformacje, podana jest w pracy MARCINIAKA [5]. Polega ona na skręcaniu próbki w postaci cienkiej okrągłej tarczy z otworem w środku. Tarcza mocowana jest na obwodzie zewnętrznym i wewnętrznym. Na powierzchni czołowej próbki wykreśla się promienie i okręgi. Podczas skręcania uchwytu wewnętrznego względem zewnętrznego, prostoliniowe promienie ulegają zakrzywieniu. Przy danym momencie skręcającym wielkość naprężeń w tarczy zmienia się wzdłuż promienia. Analiza postaci zakrzywionych promieni pozwala określić zależność naprężeń od zniekształceń.

W pracy LITOŃSKIEGO [6] podana została metoda wyznaczania zależności naprężeń od odkształceń przy ścinaniu w oparciu o próbę skręcania stożkowych prętów.

Oryginalna metoda badawcza opisana została w pracy MARCINIAKA [7]. Pozwala ona na badanie wpływu wstępnych odkształceń plastycznych na przebieg wzmocnienia metali za pomocą rozciągania niejednorodnych próbek walcowych. Niejednorodny stan próbki uzyskuje się przez poddanie pręta walcowego częściowemu przeciągnięciu przez stożkowy otwór pierścienia ciągowego, a następnie spęczaniu drugiego końca w tej samej stożkowej tulei. W wyniku takiego zabiegu, walcowemu początkowo prętowi nadaje się postać stożka. Jedna jego średnica jest mniejsza od średnicy wyjściowego pręta, a druga — większa. Tylko w środkowym przekroju średnica materiału nie uległa zmianie i jego własności są takie, jak materiału wyjściowego. Po jednej stronie tego przekroju materiał doznał osiowego wydłużenia, po drugiej — spęczenia. Stożkowy profil wzdłuż próbki zapewnia ciągłość zmian stanu odkształcenia materiału od wartości około  $-4\%$  do  $+4\%$ . Z tak przygotowanego materiału wykonuje się próbkę walcową do badania na jednoosiowe rozciąganie. Na walcową powierzchnię próbki, przed rozciąganiem, nanosi się cienkie rysy. Pomiaru wydłużeń odcinków między rysami pozwalają na wyznaczanie rozkładu odkształceń wzdłuż próbki. Ponieważ wstępne odkształcenia plastyczne są zmienne na długości próbki, badania te pozwalają określić wpływ wstępnych odkształceń na kształt krzywej umocnienia metalu, na podstawie badania jednej próbki.

#### 4. Badanie plastycznego płynięcia metali przy złożonych sposobach obciążenia próbek rurkowych

##### 4.1. Uwagi ogólne

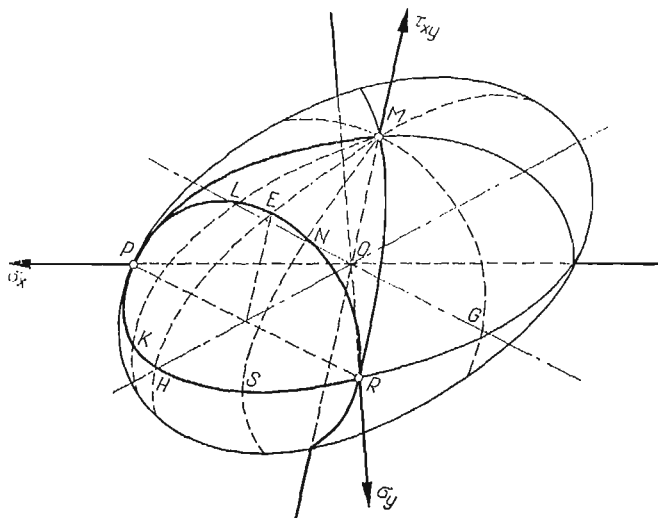
Znajomość zachowania się materiału przy prostych obciążeniach jest niewystarczająca aby było można dokładnie przewidzieć jego zachowanie w warunkach złożonego stanu obciążenia. Badania doświadczalne plastycznego płynięcia przy złożonych obciążeniach przeprowadzane są z reguły w płaskim stanie naprężenia, tj. gdy jedno z naprężeń głównych, np.  $\sigma_3$ , jest równe zeru. W układzie współrzędnych prostokątnych  $x, y, z$ , płaszczyzny  $xy$  pokrywają się z płaszczyzną kierunków głównych 1 i 2, istnieją wobec tego tylko składowe naprężenia  $\sigma_x, \sigma_y$  i  $\tau_{xy}$ . Pozostałe składowe naprężenia równają się zeru.

Główną przyczyną szerokiego rozpowszechnienia badań doświadczalnych w płaskim stanie naprężenia jest łatwość ich realizacji. Dla pokazania różnych schematów obciążenia, stosowanych przy badaniu doświadczalnym materiałów w płaskim stanie naprężenia, rozpatrzmy warunek plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego w postaci

$$(2) \quad \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2 = 3k^2,$$

gdzie  $k$  jest granicą plastyczności przy ścinaniu.

W warunku tym  $k = \sigma_{pl} \sqrt{3}$ , gdzie  $\sigma_{pl}$  jest granicą plastyczności przy jednoosiowym rozciąganiu.



Rys. 1

Obrazem geometrycznym tego wyrażenia w przestrzeni naprężeń  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ , jest elipsoida (rys. 1) o jednej osi pokrywającej się z osią  $\tau_{xy}$ . Dwie pozostałe osie elipsoidy leżą w płaszczyźnie  $\sigma_x \sigma_y$ , przy czym są one dwusiecznymi kątów między osiami  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$ . Na powierzchni elipsoidy można wyodrębnić pewne szczególne elipsy, które odpowiadają stosowanym w doświadczeniach różnym sposobom obciążania próbek. Elipsa przebiegająca przez punkty  $PM$ , na której  $\sigma_y = 0$ , odpowiada na przykład doświadczeniu, w którym próbki rurkowe są jednocześnie skręcane i rozciągane lub ściskane siłą osiową, jeżeli jako  $x$  przyjąć kierunek tworzących na próbce. Stany naprężenia określone punktami leżącymi na elipsie przechodzącej przez punkty  $MR$  ( $\sigma_x = 0$ ), można zrealizować przez skręcanie próbki rurkowej z jednoczesnym obciążaniem jej ciśnieniem wewnętrznym (dodatni kierunek osi  $\sigma_y$ ) lub ciśnieniem zewnętrznym (kierunek ujemny osi  $\sigma_y$ ). Jest oczywiste, że dla uniknięcia składowej osiowej naprężenia  $\sigma_x$  (wywołanej ciśnieniem wewnętrznym), końce próbki nie mogą być zamknięte. Elipsa przechodząca przez punkty  $PHR$ , na której  $\tau_{xy} = 0$ , odpowiada jednoczesnemu obciążaniu próbek rurkowych siłą osiową (rozciągającą lub ściskającą) i ciśnieniem wewnętrznym lub zewnętrznym. Stany naprężenia na tej elipsie mogą być również realizowane przy obciążaniu próbek płaskich, jednocześnie w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, naprężeniami o różnej wielkości.

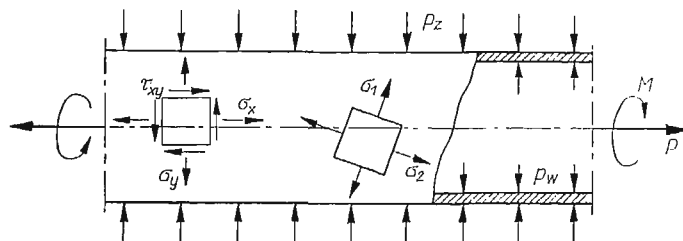
Na próbkach płaskich istnieje również możliwość uzyskiwania stanów naprężenia odpowiadających punktom elipsy  $PLENR$ . Sposób realizowania tych stanów naprężenia zostanie omówiony w punkcie 5.2.

Ze względu na rodzaj użytych próbek, badania doświadczalne płynięcia plastycznego materiałów w warunkach złożonego stanu naprężenia można podzielić na dwie grupy. Do grupy pierwszej, liczniejszej, zaliczamy badania na próbkach rurkowych, do grupy

drugiej — badania na próbkach płaskich. W pracy omówione zostaną obie grupy badań, ich zalety i wady.

#### 4.2. Badania na próbkach rurkowych

4.2.1. Wiadomości wstępne. Jak już wspomniano w poprzednim punkcie, jednym ze sposobów przeprowadzenia badań materiałów w warunkach złożonego stanu naprężenia są doświadczenia na cienkościennych próbkach rurkowych (rys. 2). Siła osiowa



Rys. 2

$P$  wywołuje równomiernie rozłożone naprężenia osiowe, moment skręcający  $M$  daje na ściance równomiernie rozłożone naprężenia styczne, i wreszcie, pod działaniem ciśnienia  $p$  w próbce pojawiają się naprężenia obwodowe. Dowolna kombinacja w/w obciążeń wywołuje w próbce określony płaski stan naprężenia. W tabelicy 1 podano zestawienie wszyst-

Tablica 1. Sposoby obciążania próbek rurkowych

Nr	Siła osiowa	Ciśnienie	Skręcanie
1	rozciąganie	wewn.	—
2	„	zewn.	—
3	„	—	skręc.
4	„	wewn.	„
5	„	zewn.	„
6	ściskanie	wewn.	—
7	„	zewn.	—
8	„	—	skręc.
9	„	wewn.	„
10	„	zewn.	„
11	—	wewn.	skręc.
12	—	zewn.	skręc.

kich możliwych sposobów obciążania próbek rurkowych, które pozwalają realizować dowolny stan naprężenia na elipsoidzie z rys. 1.

Przybliżone wzory na naprężenia osiowe  $\sigma_x$ , naprężenia obwodowe  $\sigma_y$  i styczne  $\tau_{xy}$  (przy skręcaniu) mają w ogólnym przypadku następującą postać:

$$(3) \quad \sigma_x = \frac{P}{\pi h(d+h)} + \frac{pd^2}{4h(d+h)},$$

$$(4) \quad \sigma_y = \frac{pd^2}{2h(d+h)},$$

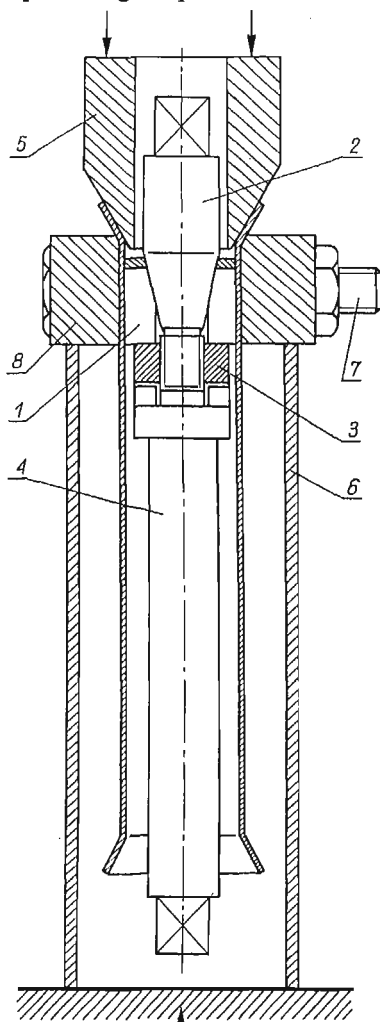
$$(5) \quad \tau_{xy} = \frac{2M}{\pi dh(d+h)},$$

gdzie przez  $h$  oznaczono grubość ścianki, a przez  $d$  — średnicę wewnętrzną próbki.

Ponieważ, z założenia, grubość ścianki rurki jest mała w porównaniu ze średnicą ( $h/d = 0,05-0,02$ ), można przyjąć, że rozkład składowych naprężeń  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\tau_{xy}$  na grubości ścianki jest jednorodny. Podane naprężenia będą więc składowymi tensora naprężenia również na zewnętrznej powierzchni próbki.

W zależności od rozwiązania konstrukcyjnego urządzenia badawczego, pod działaniem ciśnienia wewnętrznego może pojawiać się w próbce składowa osiowa naprężenia lub nie. Jak wiadomo, w przypadku zamkniętego na końcach cylindra, ciśnienie wewnętrzne wywołuje stan naprężenia, którego składowa obwodowa jest dwa razy większa od składowej osiowej.

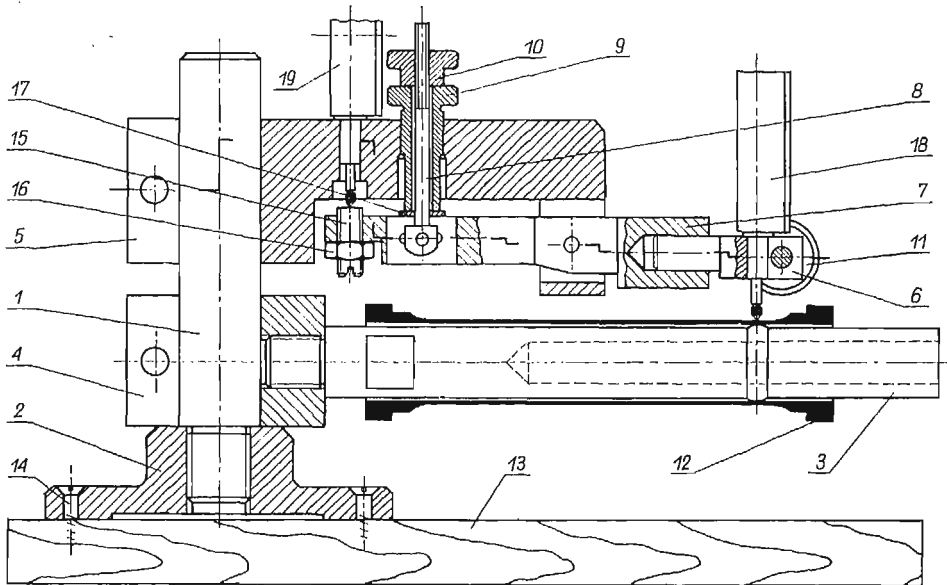
4.2.2. *Próbki i ich przygotowanie do badań.* Istnieją dwa sposoby przygotowania do badań próbek rurek. Jeden sposób polega na wykonywaniu ich z pręta, drugi — z gotowych rur [8-12]. W drugim sposobie odcinki rury o odpowiedniej długości



Rys. 3

poddawane są selekcji. Do badań dopuszczane mogą być tylko te próbki, które mają prawidłowy przekrój kołowy i równomierny rozkład grubości w badanym obszarze. Następnie, na końcach próbek formuje się stożkowe uchwyty. Na rys. 3 pokazano konstrukcję urządzenia do roztlaczania kołnierzy. Urządzenie to jest tak pomyślane, aby podczas roztlaczania końców, obszar środkowy próbki nie przenosił obciążeń i nie doznawał w związku z tym dodatkowych odkształceń. Jest to o tyle ważne, że roztlaczanie wykonuje się zwykle po uprzednim wyżarzaniu. Wyżarzanie ma na celu usunięcie anizotropii własności mechanicznych, wywołanych zgniotem przy ciągnięciu, oraz ułatwienie roztlaczania kołnierzy.

Próbka mocowana jest na tulei dzielonej 1 przez dokręcanie nakrętki 3 na trzpieniu 2 za pośrednictwem trzonek 4. Po tym zabiegu trzonek 4 zostaje usunięty. Następnie na próbkę zakłada się obejmę 8 i silnie skręca śrubami 7. Całość, po wstawieniu w tuleję 6, jest ustawiana na stole prasy, a wciskany z góry stożkowy stempel 5 roztlacza koniec próbki.



Rys. 4

Przed przystąpieniem do badań próbki muszą być dokładnie zmierzone. Ze względu na zależności (3), (4) i (5) należy określić średnice wewnętrzne i grubości ścianek. Pomiar średnicy wewnętrznej można wykonać średnicówką. Można ją również obliczyć na podstawie znajomości średnicy zewnętrznej i grubości ścianki. Pomiar taki jest jednak obarczony większym błędem niż bezpośredni.

Do pomiaru grubości ścianki konieczne są dodatkowe urządzenia. Jedno z rozwiązań takiego urządzenia pokazano na rys. 4. Urządzenie wyposażone jest w dwa czujniki mikronowe. Jeden — pomiarowy 18 — służy do bezpośredniego pomiaru grubości próbki, drugi czujnik — kontrolny 19 — służy do odpowiedniego ustawienia dźwigni 7, w której umocowany jest czujnik pomiarowy. Ponieważ maksymalny przesuw trzpienia czujnika mikronowego, wynoszący około 1,2 mm, jest mniejszy od grubości kołnierza próbki, dla założenia jej na wspornik 3 konieczne jest uniesienie dźwigni wraz z czujnikiem pomia-

rowym do góry. Po wsunięciu próbki na wspornik, dźwignia zostaje opuszczona do położenia pierwotnego, przy którym czujnik pomiarowy ustawiony był na wypukłości wspornika w położeniu zerowym. Powrót do położenia pierwotnego możliwy jest dzięki wskazaniom drugiego czujnika (kontrolnego), umocowanego w korpusie przyrządu. Wskazówka czujnika kontrolnego, po opuszczeniu dźwigni, musi mieć położenie identyczne z tym, jakie ustalono przed jej uniesieniem, i przy którym ustawiono wartość zerową czujnika pomiarowego. Unieruchomienie dźwigni we właściwym położeniu dokonywane jest za pomocą nakrętek 9 i 10.

4.2.3. Przyrządy i aparatura badawcza. W literaturze jest cały szereg pozycji, które w sposób wyczerpujący podają rozwiązania konstrukcyjne oraz możliwości eksploatacyjne maszyn do badań wytrzymałościowych produkowanych seryjnie [1, 28, 31, 32]. Jedne z nich służą do przeprowadzania prostych prób wytrzymałościowych, takich jak: rozciąganie, ściskanie czy zginanie, inne — do badań wytrzymałościowych w złożonym stanie naprężenia. Mogą być również maszyny uniwersalne, które łączą możliwości jednych i drugich. Jednym z bardziej rozpowszechnionych typów maszyn uniwersalnych do badań przy złożonych sposobach obciążenia jest zrywarka zbudowana w VEB Werkstoffprüfmaschinen w Lipsku (dawniej Schopper). Umożliwia ona przeprowadzanie oddzielnych prób na rozciąganie, ściskanie, zginanie i skręcanie, poddawanie próbek rurekowi działaniu ciśnienia wewnętrznego oraz pozwala na jednoczesne zastosowanie kombinacji rozciągania, ściskania, skręcania i ciśnienia wewnętrznego. Według tablicy 1, będą to sposoby obciążania oznaczone numerami 1, 3, 4, 6, 8, 9 i 11. Tego typu maszyny pozwalają na przeprowadzanie badań wg programów, w których regulowanymi i kontrolowanymi parametrami są zewnętrzne obciążenia, a więc, są to maszyny typu siłowego.

Dla wielu metali wraz ze wzrostem odkształceń plastycznych gwałtownie maleje wzmocnienie. Wówczas to, przy realizacji programów według zewnętrznych obciążeń, nie ma możliwości ani zachowania stałych parametrów odkształcenia, ani dokładnego określania ich zmian. Dlatego, oprócz seryjnie produkowanych maszyn uniwersalnych wymienionego typu, do badań w złożonym stanie naprężenia używane są również specjalne urządzenia. Są to zarówno urządzenia typu siłowego, jak i kinematycznego. W tych ostatnich, regulowanymi i kontrolowanymi parametrami są przemieszczenia punktów odkształcanej próbki. Jeszcze jedną — trzecią — grupę będą stanowiły maszyny z programowodzącymi układami, w których mogą być realizowane dowolne programy obciążania lub odkształcania próbki.

Forma wykresów rozciągania lub ściskania większości materiałów konstrukcyjnych przy statycznym obciążaniu w normalnej temperaturze może nie zależeć od typu maszyny, o ile zachowana będzie w badaniach podobna prędkość odkształcania (w granicach nie mających jeszcze wpływu na wyniki badań). Wyjątek stanowią tu jedynie materiały o wyraźnej granicy plastyczności.

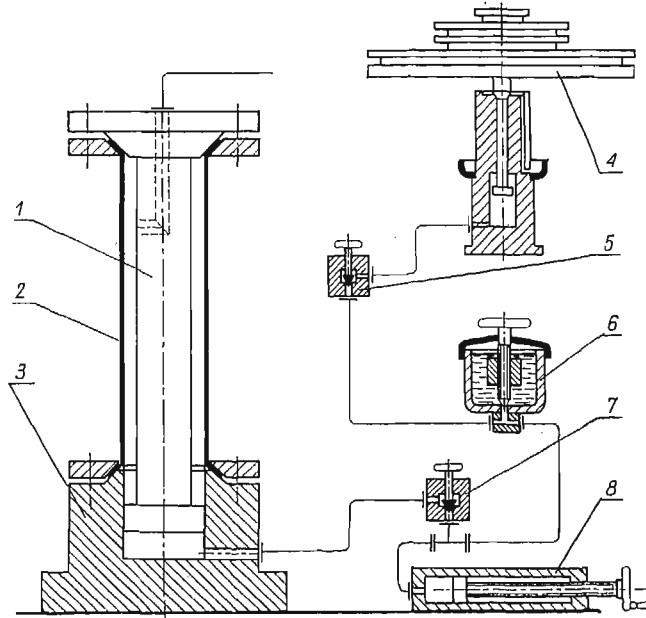
Dla wyeliminowania wpływu sprężystych odkształceń układu obciążającego oraz wpływu przemieszczeń układu dźwigniowego maszyny, odkształcenia próbek należy mierzyć na wydzielonej bazie.

Typ maszyny odgrywa istotną rolę również przy badaniu pełzania. Metodyka tych badań nie będzie w pracy omawiana, ale warto podkreślić, że bez pełnej automatyzacji



obciążania i pomiarów — za pomocą elektrycznych tensometrów oporowych, urządzeń programowych, elektronicznych układów sterujących oraz rejestratorów — badanie z daną prędkością odkształcenia lub z daną prędkością przyrostu naprężenia byłoby niemożliwe.

Na kilku przykładach zostanie teraz podany opis rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń specjalnych pracujących w krajowych i zagranicznych ośrodkach naukowych. W IPPT PAN w Warszawie są dwa różne urządzenia tego typu. Jedno z nich jest pokazane na rys. 5. Urządzenie jest wyposażone w dwa niezależne hydrauliczne układy obciążające. Schemat działania jednego z układów zasilających pokazany jest po prawej stronie rysunku. Olej



Rys. 5

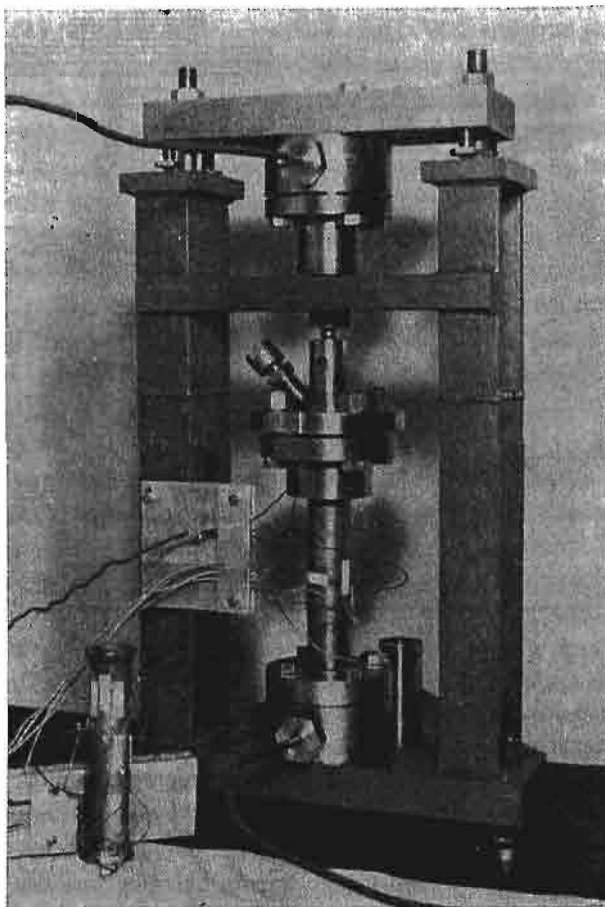
zassany ze zbiornika 6 do cylindra 8 jest kierowany do przyrządu pod ciśnieniem, o wielkości którego decyduje ciężar obciążników 4. Jeden układ obciążający wywołuje w próbce 2 osiowe naprężenia, drugi — doprowadza olej pod ciśnieniem do wnętrza próbki, wywołując w niej naprężenia obwodowe. Niezależność obydwu układów obciążających pozwala na realizację dowolnej drogi obciążenia na płaszczyźnie naprężeń obwodowych i osiowych. Wielkości obciążeń określone są z wartości ciśnienia układów zasilających. Odkształcenia próbek mierzone są za pomocą tensometrów mocowanych na powierzchni próbek.

Opis konstrukcji i schemat działania drugiego urządzenia jest podany w pracy TURSKIEGO [10]. Na rys. 6 pokazany jest widok głowicy urządzenia, w której próbka jest mocowana i obciążana. Podobnie jak w pierwszym rozwiązaniu (rys. 5), przyrząd jest wyposażony w dwa niezależne hydrauliczne układy obciążające. Rozwiązanie konstrukcyjne głowicy pozwala na obciążanie próbek dowolną kombinacją osiowego rozciągania lub ściskania i ciśnienia wewnętrznego.

Oryginalną maszynę do badań doświadczalnych na próbkach rurkowych zbudowano w Institute of Technology w Tokio, w Japonii (SHIRATORI, IKEGAMI i KANEKO [13]). Ma-

szyna umożliwia poddawanie cienkościennych próbek rurkowych różnym kombinacjom obciążenia osiowego, wewnętrznego lub zewnętrznego ciśnienia i skręcania. Maszyna pozwala więc na realizację wszystkich dwunastu sposobów obciążania z tablicy 1.

Precyzyjną maszynę do jednoczesnego obciążania próbek rurkowych siłą osiową, momentem skręcającym i ciśnieniem wewnętrznym w normalnej temperaturze skonstruowano na Uniwersytecie w Moskwie [33]. Elektryczne tensometry oporowe, naklejane na powierzchni próbki, pozwalają na sterowanie i rejestrację przebiegu doświadczenia. Ogólny widok maszyny jest pokazany na rys. 7. Próbka 8 obciążana jest za pośrednictwem dwu-

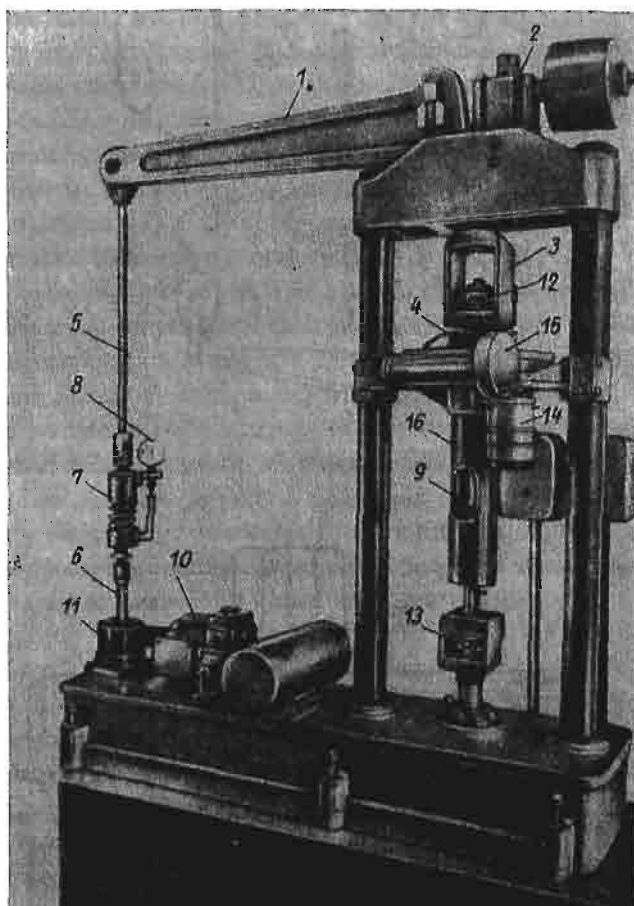


Rys. 6

ramiennej dźwigni 1, pryzmy 2 i obejmy 3, w której zamocowany jest uchwyt 4. Naciąg drugiego ramienia dźwigni odbywa się przez cięgno 5 i śrubę 6. Między cięgnem a śrubą umieszczona jest sprężyna 7. Wskaźnik 9, rejestrujący odkształcenia sprężyny, pozwala odczytywać wielkość obciążenia przyłożonego do próbki. Podczas obciążania osiowego próbki silnik 10 przesuwą śrubę za pomocą przekładni ślimakowej 11. Przeguby 12 i 13 zapewniają osiowe przyłożenie siły do próbki. Moment skręcający przekazywany jest do próbki od silnika elektrycznego 14 przez reduktor ślimakowy 15, którego korpus połączony

jest z obudową 16. Moment skręcający i siła osiowa mierzone są za pomocą elektrycznych tensometrów oporowych naklejanych na obciążony obszar uchwytu 4. Elektroniczny system sterujący oraz układy wykreślnego programowania i rejestrowania maszyny gwarantują realizowanie badań według dowolnego programu w czasie.

Innym, szeroko znanym, ośrodkiem w ZSRR wyposażonym w specjalne urządzenia do badania próbek rurkowych jest Uniwersytet w Leningradzie.

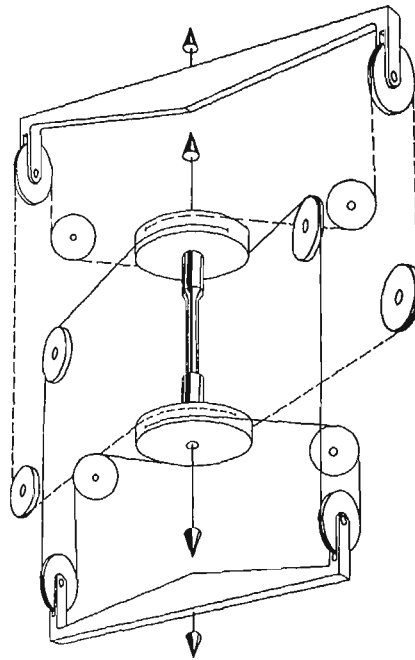


Rys. 7

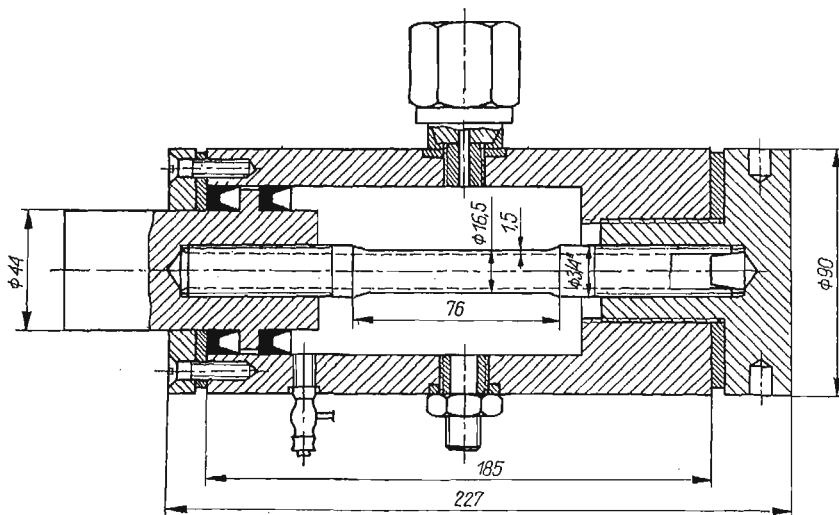
W pracy FINDLEYA i GJELSVIKA [14] opisana jest maszyna do prób na skręcanie z jednoczesnym rozciąganiem próbek rurkowych, zbudowana w Brown University, USA. Schemat działania pokazany jest na rys. 8.

W pracach NAGHDIEGO i współpracowników [15, 16] podany jest opis aparatury znajdującej się w University of Michigan, USA. Aparatura ta umożliwia badania próbek rurkowych na rozciąganie z jednoczesnym skręcaniem.

Podobne urządzenia do badania próbek rurkowych, obciążanych kombinacją osiowego rozciągania i skręcania, znajdują się w Yale University, New Haven, Conn, USA (PHILLIPS [17]) oraz w Hughes Aircraft Company Inc., Culver City, California, USA (FEIGEN [18]).



Rys. 8



Rys. 9

W pracy DAVIS [19] podany jest opis maszyny umożliwiającej obciążanie próbek dowolną kombinacją siły osiowej, momentu skręcającego i ciśnienia wewnętrznego. Znajduje się ona w East Pittsburgh, Pa, Westinghouse Research Laboratories, USA.

Opis specjalnej aparatury badawczej, wykonanej w University of Manchester, England, można znaleźć w pracy GILLA i PARKERA [20]. Aparatura pozwala na przeprowadzanie

badania próbek rurkowych poddawanych jednoczesnemu działaniu siły osiowej, ciśnienia wewnętrznego i momentu skręcającego.

Wymienione wyżej urządzenia tworzą z reguły samodzielne jednostki obciążająco-rejestrujące. Badania próbek rurkowych w płaskim stanie naprężenia mogą być również przeprowadzane w przyrządach stanowiących wyposażenie uzupełniające maszyn wytrzymałościowych. Przykładem takiego rozwiązania jest aparat wykonany w Mechanical Engineering Department, METU, Ankara, Turkey, którego rysunek (rys. 9) został zaczerpnięty z pracy BRATTA i KANANA [21]. Aparat umożliwia obciążanie próbek rurkowych dowolną kombinacją osiowego ściskania i ciśnienia zewnętrznego, tzn. przeprowadzanie badań w trzeciej ćwiartce płaszczyzny naprężeń głównych.

Inne rozwiązanie aparatu pracującego w połączeniu ze zrywarką uniwersalną zostało podane w pracy SMITHA i ALMROTHA [22]. Aparat umożliwia obciążanie próbek rurkowych jednoczesnym działaniem siły osiowej i momentu skręcającego. Został on skonstruowany w Lockheed Palo Alto Research Laboratory, Palo Alto, Calif., USA.

Urządzenia do badania próbek pod działaniem złożonych sposobów obciążania znajdują się również w wielu innych ośrodkach naukowych. Na przykład, można tu wymienić Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej [23, 24] oraz Laboratorium Szkoły Politechnicznej w Paryżu we Francji.

Omówionych zostało wiele odmian aparatury do badania materiałów w złożonych stanach naprężenia, jednakże praca nie ma na celu pokazania ich wszystkich. W tym krótkim przeglądzie chodziło jedynie o pokazanie różnorodności rozwiązań konstrukcyjnych aparatury badawczej i zwrócenie uwagi na dużą ilość ośrodków naukowych na świecie, zajmujących się badaniami w warunkach złożonego stanu naprężenia. Świadczy to bowiem przekonująco o ważnej roli i znaczeniu tych badań.

4.2.4. Uwagi końcowe. Badania na próbkach rurkowych są trudne, wymagają specjalnych urządzeń i są bardzo praco- i czasochłonne. Mimo to, korzyści jakie z nich płyną spowodowały szerokie ich rozpowszechnienie. Nie zawsze jednak zdajemy sobie sprawę z tego, że oprócz niewątpliwych zalet, badania na próbkach rurkowych są obciążone istotnymi wadami. Do najważniejszych z nich zaliczamy:

1. Brak możliwości badania materiału w postaci blach.
2. Trudności w przygotowaniu próbek o żądanej anizotropii plastycznej.
3. Trudności przy zachowaniu stałego stosunku między składowymi naprężeniami podczas obciążania, ze względu na zmiany średnicy próbki przy jej odkształcaniu.
4. Warunki naprężenia panujące w próbce rurkowej nie są dokładnie dwuwymiarowe (zakłócony płaski stan naprężenia), ponieważ naprężenia obwodowe wywoływane są przez ciśnienie wewnętrzne i zewnętrzne.

Dlatego też, równoległe do badań na próbkach rurkowych, są stosowane i rozwijane metody badań próbek płaskich w dwuwymiarowym stanie naprężenia. Niektóre z tych metod są w znacznym stopniu wolne od wad wyżej wymienionych. Oprócz tego, badania te cechuje duża prostota i łatwość przygotowania próbek. Nie oznacza to jednak, że badania na próbkach płaskich są w stanie zastąpić omówione uprzednio doświadczenia na próbkach rurkowych. Jedne i drugie badania wzajemnie się uzupełniają i powinny być rozwijane równoległe.

Wyniki doświadczeń przeprowadzanych na próbkach płaskich, a zwłaszcza badania krzywej granicznej, która dla początkowo izotropowego materiału ma kształt elipsy *PLENR* na rys. 1, w połączeniu z wynikami badań próbek rurkowych, będą mogły lepiej i dokładniej odzwierciedlać zmiany elipsoidy granicznej związane z anizotropią, a wywołane w początkowo izotropowym materiale plastycznymi odkształceniami.

Stosowane są różne metody badania własności materiałów na próbkach płaskich w warunkach złożonego stanu naprężenia. Różnią się one od siebie zarówno kształtem próbek, jak i sposobem ich obciążania. Jedne próbki są gładkie inne z nacięciami. Mogą być rozciągane, zginane lub obciążane kombinacją dwuosowego rozciągania, dwuosowego ściskania oraz rozciągania i ściskania.

## 5. Metody badań doświadczalnych płynięcia plastycznego metali na próbkach płaskich

### 5.1. Wiadomości wstępne

Stosowane są różne metody badania własności materiałów na płaskich próbkach w warunkach złożonego stanu naprężenia. Do najważniejszych z nich zaliczamy:

1. Określanie powierzchni płynięcia metodą jednoosiowego rozciągania próbek płaskich — metoda W. Szczepińskiego.
2. Określanie powierzchni płynięcia metodą rozciągania płaskich próbek krzyżowych.
3. Określanie powierzchni płynięcia metodą dwuosowego ściskania.
4. Określanie powierzchni płynięcia metodą obciążania pasma kombinacją rozciągania i ściskania poprzecznego.
5. Określanie powierzchni płynięcia metodą rozciągania płaskich próbek z nacięciami.
6. Badanie powierzchni płynięcia metodą zginanych płyt.

Niżej zostanie podany krótki opis poszczególnych metod.

### 5.2. Określanie powierzchni płynięcia metodą jednoosiowego rozciągania płaskich próbek — metoda W. Szczepińskiego

Rozpatrzmy elipsę *PLENR* utworzoną przez przecięcie elipsoidy płaszczyzną  $\sigma_x + \sigma_y = \sigma_{pl}$  prostopadłą do płaszczyzny  $\sigma_x \sigma_y$ . Podstawiając do warunku plastyczności (2) sumę  $\sigma_x + \sigma_y$ , zamiast  $\sigma_{pl}$ , otrzymujemy zależność  $\sigma_x + \sigma_y = \tau_{xy}^2$ , która musi być spełniona na tej elipsie (na elipsie *PLENR*).

Z wykresu Mohra (rys. 10) wynika, że zależność ta ma miejsce jedynie wtedy, gdy jedno z naprężeń głównych jest równe zeru. Znaczy to, że punkty leżące na elipsie *PLENR* odpowiadają stanowi jednoosiowego rozciągania w różnych kierunkach względem osi  $x$ . Na przykład punkt  $E$ , w którym  $\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy}$ , odpowiada jednoosiowemu rozciąganiu w kierunku nachylonym do osi  $x$  pod kątem  $\alpha = 45^\circ$ .

Na rys. 11 pokazano przypadek stanu naprężenia elementarnego prostokąta  $ABCD$ , którego położenie jest niezmienne w stosunku do osi  $x$  i  $y$ . Graniczny stan naprężenia w materiale równoległoboku jest realizowany w wyniku osiągnięcia przez naprężenia rozciągające  $\sigma_x$  określonej wartości granicznej  $\sigma_x$ .

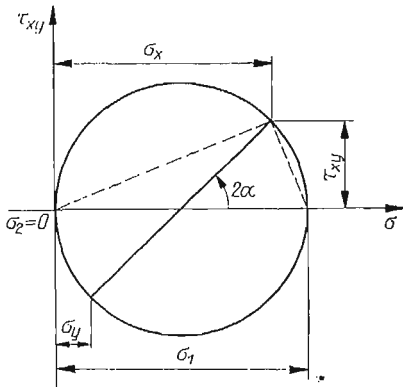
W przypadku materiału izotropowego położenie prostokąta  $ABCD$  w odniesieniu do osi współrzędnych jest obojętne, ponieważ w jego wnętrzu zawsze można znaleźć inny równoległobok znajdujący się w tym samym stanie granicznym, ale na krawędziach którego będą istniały tylko naprężenia normalne.

Po nabyciu przez materiał anizotropii, w wyniku wstępnych odkształceń plastycznych — np. w kierunku osi  $x$  — obrót taki jest niedopuszczalny.

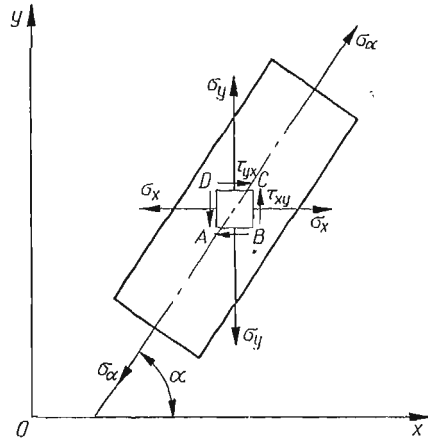
Dla znanych kątów  $\alpha$ , między kierunkiem wstępnego odkształcenia a kierunkiem obciążenia wtórnego  $\sigma_\alpha$ , zgodnie ze znanymi zależnościami, można napisać:

$$(6) \quad \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_\kappa \cdot \cos^2 \alpha, \\ \sigma_y &= \sigma_\kappa \cdot \sin^2 \alpha, \\ \tau_{yx} &= \tau_{xy} = \sigma_\kappa \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha, \end{aligned}$$

gdzie przez  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  oznaczono składowe granicznego stanu naprężenia równoległoboku  $ABCD$ .



Rys. 10



Rys. 11

Doświadczalne badania zmian formy krzywej granicznej *PLENR* (rys. 1) przeprowadza się, w oparciu o podane wyżej rozważania, metodą jednoosiowego rozciągania próbek wycinanych (w różnych kierunkach) z materiału poddanego wstępnej plastycznej deformacji.

Sposób wyznaczania i badania powierzchni plastyczności metodą jednoosiowego rozciągania płaskich próbek został podany przez SZCZEPIŃSKIEGO w roku 1963 w pracy [25]. Pozornie ta metoda jest podobna do innych znanych sposobów badania anizotropii materiałów w oparciu o próby jednoosiowego rozciągania. Badania te biorą początek od pracy von GÖLERA i SACHSA [34] z roku 1929, w której autorzy zwrócili uwagę na odmienne własności mechaniczne w próbkach wyciętych w różnych kierunkach w odniesieniu do kierunku walcowania blach z mosiądzu i srebra. Podobne zjawisko dla aluminium stwierdzili następnie SCHMIDT i WASSERMANN [35] w roku 1931. Z nowszych prac, w których zajmowano się badaniem anizotropii polikrystalicznych metali metodą rozciągania próbek wycinanych w różnych kierunkach można wymienić [36–38, 54–56]. Wyniki tych badań przedstawiano we współrzędnych biegunowych, gdzie wzdłuż promieni odkładane są wartości badanego parametru lub we współrzędnych prostokątnych, w których badana wielkość mechaniczna jest funkcją kąta  $\alpha$ .

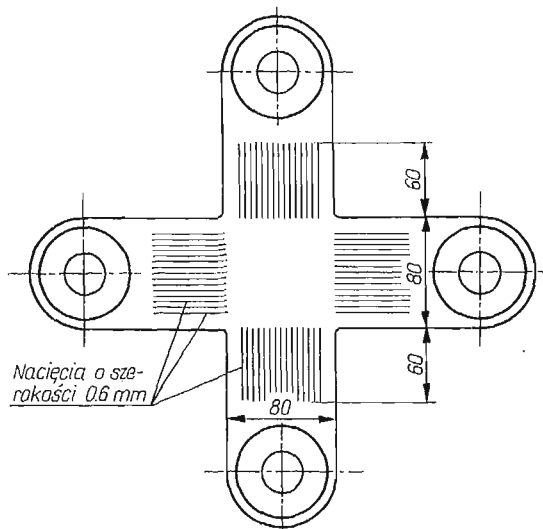
Podany przez SZCZEPIŃSKIEGO związek wyników prób jednoosiowego rozciągania z krzywą graniczną *PLENR* na powierzchni plastyczności (rys. 1) umożliwił przeprowa-

dzenie szerszej i głębszej analizy wyników doświadczeń. W oparciu o tę metodę wykonano do tej pory zaledwie kilka badań [25–27, 39, 57] ale otrzymane z nich wyniki zasługują na uwagę. Metodę tę stosowałem w swoich badaniach wtórnej powierzchni płynięcia przy poszukiwaniu efektu pamięci materiału poddanego dużym odkształceniom plastycznym. Wyniki tych badań zostały podane w pracy [27].

Najprostsze doświadczenia, zgodnie z omawianą metodą, przeprowadza się w następujący sposób. Dużą próbkę, wyciętą z arkusza blachy, poddaje się rozciąganiu w określonym kierunku aż do momentu uzyskania planowanej wartości obciążenia. Następnie, po odciążeniu, z tej dużej próbki wycina się małe próbki pod różnymi kątami  $\alpha$  do kierunku wstępnego obciążenia. Każdą małą próbkę poddaje się ponownemu jednoosiowemu rozciąganiu dla znalezienia zależności naprężenia-odkształcenia. Wykresy te są podstawą do wyznaczania krzywej granicznej, odpowiadającej elipsie *PLENR* na powierzchni plastyczności dla materiału przed plastycznym odkształceniem.

### 5.3. Określanie powierzchni płynięcia metodą badania płaskich próbek krzyżowych

Bardzo często w konstrukcjach budowlanych połączenia wykonane są z płaskich elementów blaszanych. W większości przypadków na konstrukcje te działają obciążenia statyczne, przy czym dopuszcza się w nich nieznaczny rozwój odkształceń plastycznych.



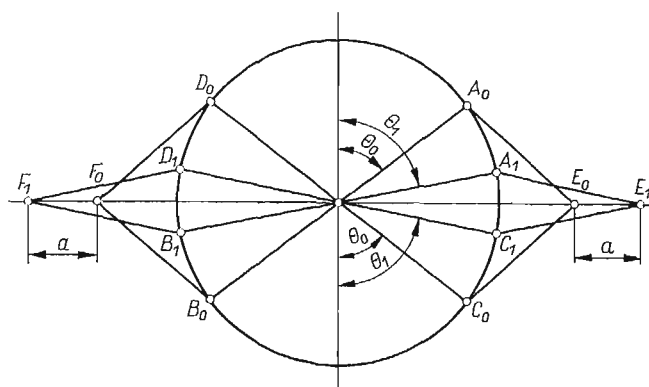
Rys. 12

Zastępując próbki rurkowe płaskimi, możliwe jest przeprowadzenie badań doświadczalnych tych próbek w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, w jakich pracują elementy blaszane konstrukcji budowlanych. Kształt tych próbek zależy od rodzaju obciążeń jakim będą one poddawane. Na rys. 12 pokazano płaską próbkę krzyżową, taką, jakie w pracach [58–60] stosowano do badań w warunkach dwuosiowego rozciągania. Wąskie przecięcia w ramionach wykonuje się dla uzyskania wyrównanego obciążenia części środkowej próbki. Plastyczne odkształcenie początkowo rozwija się w częściach chwytowych próbki,



osłabionych nacięciami. Po umocnieniu się materiału w ramionach próbki, wywołanym plastycznym odkształceniem, wzrost obciążenia wywołuje następnie plastyczne odkształcenia w części środkowej próbki. Odkształcenia próbki mierzono elektrycznymi tensometrami oporowymi i tensometrami mechanicznymi. W pobliżu nacięć, na stosunkowo małych obszarach (4–5 mm), występowała podczas obciążania koncentracja naprężeń, która jednak w miarę zbliżania się do obszaru środkowego próbki zanikała. W obszarze pomiarowym próbki naprężenia rozkładały się więc dostatecznie równomiernie. Stopień jednorodności naprężeń w rejonie rozmieszczonych czujników pomiarowych ustalano na podstawie wykresów  $\sigma - \varepsilon$  (naprężenie-odkształcenie) wyznaczanych w różnych miejscach i kierunkach. Próbki obciążano w specjalnym urządzeniu dźwigniowym. Zwiększanie obciążeń odbywało się w nim przez napełnianie wodą pojemnika zawieszonoego na dźwigni obciążającej.

Odmienne urządzenie do dwuosowego rozciągania próbek krzyżowych zostało podane przez GORBA i OSTROWSKIEGO w pracach [62, 63].



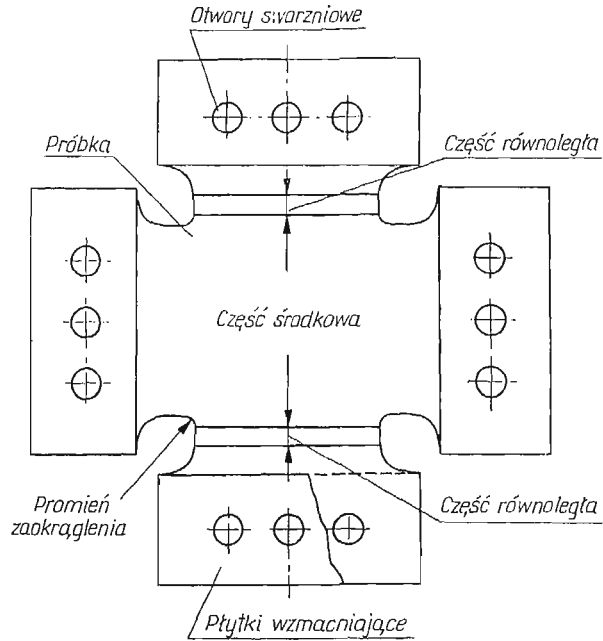
Rys. 13

Zagadnieniem badania płaskich próbek, poddawanych dwuosowemu rozciąganiu, zajmują się również SHIRATORI i IKEGAMI w pracy [40]. Stosowane przez nich próbki krzyżowe różnią się znacznie od pokazanych na rys. 12. Próbki obciążane są w specjalnej maszynie badawczej. Obciążenie robocze jest wywoływane przez olej doprowadzany pod ciśnieniem z dwóch pomp. Każda pompa zasila dwa hydrauliczne podnośniki ustawione na przeciw siebie. Obciążenie to jest przekazywane do próbki za pośrednictwem wózków i uchwytów. Do wózków przymocowany jest mechanizm równomiernego przesuwu, typu pantografu, który utrzymuje próbkę w stałym położeniu środkowym. Połączenia sworzniowe w uchwytach są dodatkowym zabezpieczeniem próbek przed poślizgiem.

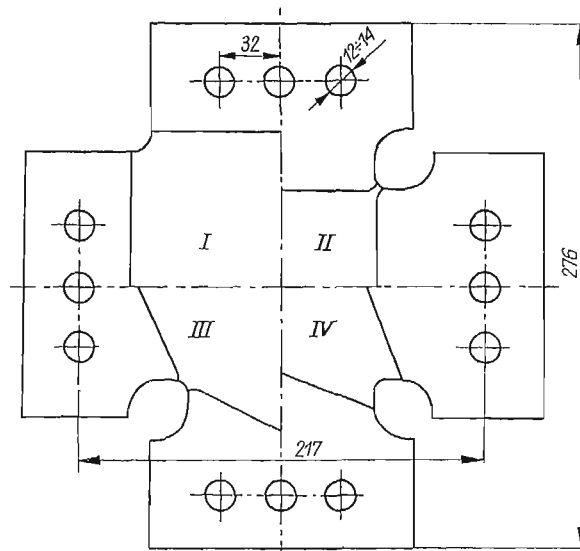
Na rys. 13 pokazano schemat mechanizmu do równomiernego przesuwu. Jak już wyżej wspomniano, jest to mechanizm typu pantografu, złożony z sześciu prętów —  $A_0B_0$ ,  $C_0D_0$ ,  $A_0E_0$ ,  $C_0E_0$ ,  $D_0F_0$  i  $B_0F_0$ . Pręty te są połączone sworzniami w punktach  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$ ,  $D_0$ ,  $E_0$  i  $F_0$ . Środki prętów —  $A_0B_0$  i  $C_0D_0$  — są przymocowane do podstawy maszyny, a punkty  $E_0$  i  $F_0$  — do wózków umieszczonych na przeciw siebie. Podczas przesuwania się punktu  $E_0$  do położenia  $E_1$ , pręty  $A_0B_0$  i  $C_0D_0$  obrócą się odpowiednio do położenia  $A_1B_1$  i  $C_1D_1$ . Zatem, punkt  $F_0$  przesuwa się do położenia  $F_1$ , o odcinek równy

$E_0 E_1$ . Tak więc, przesunięcia dwóch wodzików są równe, a środek próbki nie ulega przesunięciu w czasie przeprowadzanych badań. Obciążenie doprowadzane do próbki jest mierzone między uchwytem a wodzikiem.

Próbki używane do badań składały się z płaskiego krzyżowego korpusu i ośmiu płytek wzmacniających ramiona próbki. Kształt i części składowe próbki pokazane są na rys. 14.



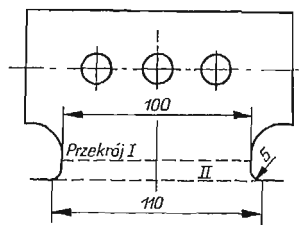
Rys. 14



Rys. 15

W metodyce badań tego typu próbek wymagane jest aby: a) obszar równomiernej plastycznej deformacji w próbce był możliwie duży, b) stan naprężenia w wymienionym obszarze był jednoznacznie określony dla danego obciążenia. Pierwszy warunek związany jest z rozmiarem i kształtem poszczególnych obszarów próbki, natomiast drugi warunek związany jest z zaokrąglonym przejściem między ramionami próbki. Oba te warunki zostały zbadane doświadczalnie, a wyniki tych badań uwzględnione przy ostatecznym wyborze kształtu i wymiarów próbki. Doświadczalne badania równomierności odkształceń przeprowadzono na czterech odmianach próbek (rys. 15). Najkorzystniejszym rozwiązaniem okazała się próbka typu *III*. W próbce tej płyty wzmacniające mają od strony środkowej wklęsłe wycięcia. Zmniejszają one wpływ oddziaływania ramion na środkowy obszar próbki.

Na podstawie pomiarów rozkładu naprężeń w obszarze środkowym próbki stwierdzono, że zaokrąglenie między ramionami próbki nie ma większego wpływu na warunki naprężenia panujące w tym obszarze. Najkorzystniejsza sytuacja jest jednak wówczas, gdy promień tego zaokrąglenia jest możliwie mały. Naprężenie nominalne jest, jak wiadomo, definiowane jako iloraz obciążenia przez powierzchnię przekroju. Naprężenia te obliczono dla dwóch przekrojów, *I* i *II*, (rys. 16). Cyfrą *I* oznaczono przekrój najwęższej części



Rys. 16

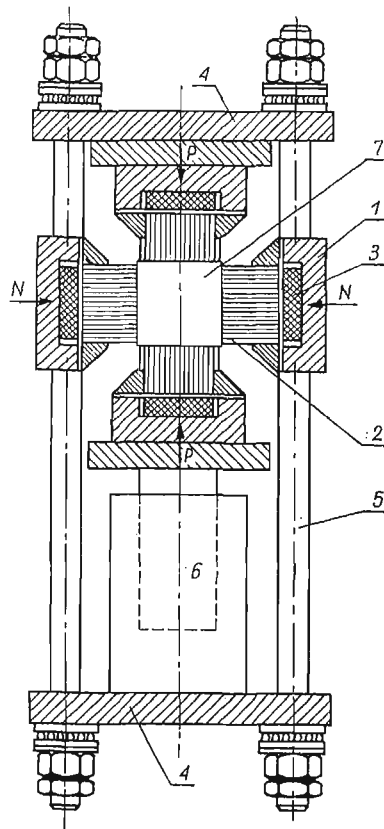
ramienia próbki, a przez *II* — przekrój przechodzący przez punkty styku stycznej do dwóch sąsiednich zaokrągleń. Próbkę poddano dwuosiomu obciążeniu, podczas których za pomocą tensometrów w kształcie rozety mierzono odkształcenia sprężyste. Określone na tej podstawie naprężenia porównano z wartościami obliczonymi. Okazało się, że zgodność ta jest lepsza dla przekroju *II*. A więc, naprężenia w centralnym obszarze próbki określano dzieląc wartości obciążenia przez pole przekroju *II*.

Łatwo zauważyć, że obszary równomiernej plastycznej deformacji w próbkach są inaczej uzyskiwane w metodzie Bałdina–Trofimowa i inaczej w metodzie Shiratori–Ikegami. W pierwszym przypadku — przez odpowiednie nacięcia części chwytowych, w drugim — przez odpowiedni kształt i geometrię płytek wzmacniających części chwytowe próbki.

#### 5.4. Określanie powierzchni płynięcia metodą dwuosowego ściskania

W pracach BAŁDINA, GEMMERLINGA i TROFIMOWA [59, 60], oprócz badań w warunkach dwuosowego rozciągania, przedstawiono również sposób przeprowadzania prób przy dwuosowym ściskaniu. Próbki wykonywano w formie grubych płytek o wymiarach 80 × 80 mm i grubości 14 do 16 mm.

Na rys. 17 pokazano schemat urządzenia ściskającego. Jak wiadomo, w zwykłych próbach na jednoosiowe ściskanie badane próbki umieszcza się między dwiema sztywnymi płytami prasy. Wadą tych badań jest to, że tarcie między płytami a powierzchniami czołowymi próbek przeszkadza w swobodnym rozwijaniu poprzecznych odkształceń i tworzeniu płaszczyzn poślizgu w końcowych częściach próbek. Dla zmniejszenia wpływu powyższego niekorzystnego zjawiska w urządzeniu na rys. 17 wprowadzono tzw. stempel



Rys. 17

podatny, złożony z pakietu wąskich płytek 2, sprężystej podkładki gumowej 3 i metalowego cylindra 1. Płytki, nie związane ze sobą, mają możliwość rozsuwania się w czasie pracy. Przekazywanie obciążenia na próbkę przez pakiet wąskich płytek (nazywanych grzebieniem) zapewnia znaczną swobodę w rozwijaniu poprzecznych odkształceń, w płaszczyźnie rysunku, końcowych części próbek. W kierunku grubości próbek istnieje w dalszym ciągu ograniczenie deformacji, tak jak przy stemplach sztywnych. Swobodna deformacja w kierunku grubości mogłaby mieć miejsce jedynie wtedy, gdyby nacisk na próbkę był wywierany za pośrednictwem pręcików, tak aby na grubości próbek umieszczonych było szereg oddzielnych igiełek. Takie rozwiązanie konstrukcyjne byłoby jednak zbyt skomplikowane.

Przyjęcie podatnego stempla w kształcie pakietu płytek oraz smarowanie czołowych powierzchni próbek proszkiem grafitowym ograniczało poprzeczną deformację w kierunku grubości do bardzo wąskich obszarów krańcowych (5–6 mm). Pozostała część badanego materiału próbki, a zwłaszcza strefa, w której dokonywano pomiarów, była wolna od wpływu trójosiowego stanu naprężenia. W kierunku poziomym (nacisk  $N$ ) próbkę obciążano w poziomej prasie, w kierunku pionowym (nacisk  $P$ ) — za pomocą hydraulicznego podnośnika 6. Podnośnik umieszczony jest w trawersie złożonej z dwóch płyt 4 i połączonych czterema ściągaczami 5.

Odmienne rozwiązania konstrukcyjne urządzeń obciążających do badania próbek przy dwuosowym, a nawet przy trójosiowym, ściskaniu podane są między innymi w pracach SOŁNCEWA i JAGNA [61] oraz KRISCHA i WERNERA [41].

#### 5.5. Określanie powierzchni płynięcia metodą obciążania pasma kombinacją rozciągania i poprzecznego ściskania

W pracach BALDINA, GEMMERLINGA i TROFIMOWA [59, 60] podana została metodyka badań pasma poddawanego rozciąganiu w jednym kierunku i ściskaniu w drugim, prostopadłym do pierwszego. Układ obciążający jest podobny do zestawu podanego na rys. 17. Różnica dotyczy tylko sposobu obciążania poziomego. Próbka w kształcie pasma ustawiona wymiarem długości w kierunku poziomym jest w tym kierunku rozciągana za pomocą zwykłej zrywarki poziomej. Ściskanie próbki (nacisk  $P$ ), podobnie jak na rys. 17, realizuje się hydraulicznym podnośnikiem poprzez podatne stemple. Podkładka gumowa 3, ułożona na dnie stalowego cylindra 1, ma na celu zabezpieczać równomierny rozkład obciążenia na płytce i niezależny udział każdej z nich w procesie obciążania.

Podobne badania, polegające na rozciąganiu płyty przy równoczesnym poprzecznym jej ściskaniu pomiędzy dwoma stemplami, przeprowadzili BOWDEN i JUKES [42].

#### 5.6. Określanie powierzchni płynięcia metodą rozciągania płaskich próbek z nacięciami

Metodę tę pierwszy zaproponował BIJLARD [43], a teorię podał HILL [49–51]. Polega ona na rozciąganiu płaskich próbek z naciętymi bruzdami (rys. 18), w których w momencie uplastycznienia pojawia się płaski dwuwymiarowy stan naprężenia. Metoda opiera się na analizie możliwości wystąpienia lokalnej linii nieciągłości prędkości oddzielającej sztywne obszary.

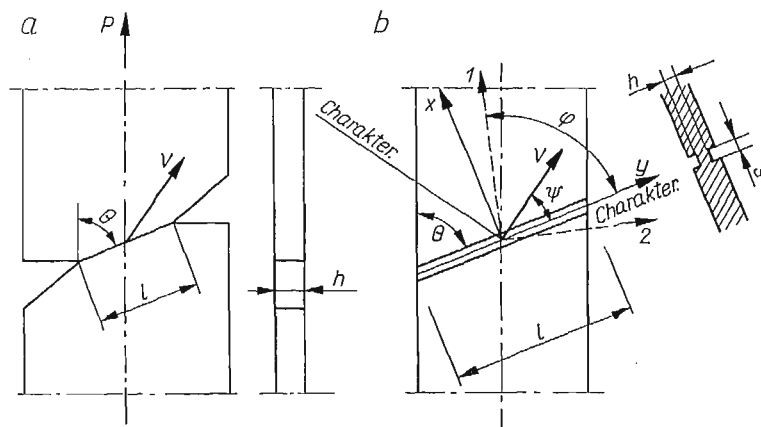
Wyniki badań określa się za pomocą parametrów Lodego  $\mu$  i  $\nu$  oraz przedstawia w głównych naprężeniach i odkształceniach. Jeżeli pasmo osłabione dwoma niesymetrycznie naciętymi korbami lub nacięte po obu stronach dwiema bruzdami (rys. 18) zostanie poddane jednoosiowemu rozciąganiu, to w strefie materiału łączącej dna korbów lub w bruzdzie pojawią się odkształcenia plastyczne. Zostaną one wywołane przy odpowiedniej wartości siły rozciągającej  $P$ . Odkształcenia te będą miały charakter ukośnego przeźwienia. Części materiału sąsiadujące z szyjką będą w stanie sprężystym, który przy małych wartościach odkształceń może być uważany jako sztywny. Względny ruch obu części sztywnych próbki określony jest przez wektor przemieszczenia lub wektor prędkości przemieszczenia  $V$ . Wektor ten jest nachylony do linii szyjki pod kątem  $\psi$  (rys. 18). Istnienie korbów lub bruzd lokalizuje odkształcenia materiału w osłabionej strefie. Wynika

stąd, że kierunek względnego przemieszczenia sztywnych części jest zależny od kąta nachylenia strefy osłabionej i od własności materiału. Jeżeli szerokość  $s$  jest dużo mniejsza od długości  $l$ , to kierunek wzdłuż szyjki i kierunek prostopadły do wektora  $V$  można uważać za nierozciągliwe. W teorii ciała idealnie plastycznego kierunki te są kierunkami charakterystyk prędkości. Zgodnie z oznaczeniami na rys. 18b, składowe wektora prędkości  $V$  wyniosą:

$$(7) \quad V_x = V \sin \psi, \quad V_y = V \cos \psi$$

a składowe tensora prędkości odkształcenia wyznaczmy z zależności

$$(8) \quad \dot{\epsilon}_x = \frac{V_x}{s} = \frac{V \sin \psi}{s}, \quad \dot{\epsilon}_y = 0, \quad \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{V_y}{2s} = \frac{V \cos \psi}{2s}.$$



Rys. 18

Główne prędkości odkształcenia otrzymamy ze wzorów:

$$(9) \quad \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \frac{V}{2s}(1 + \sin \psi), \\ \dot{\epsilon}_2 &= -\frac{V}{2s}(1 - \sin \psi), \end{aligned} \quad (\dot{\epsilon}_1 > \dot{\epsilon}_2).$$

Trzecia główna prędkość odkształcenia może być wyznaczona z warunku zmian objętości materiału w stanie plastycznym. Dla materiału nieściśliwego wynosi ona

$$(10) \quad \dot{\epsilon}_3 = -\frac{V}{s} \sin \psi.$$

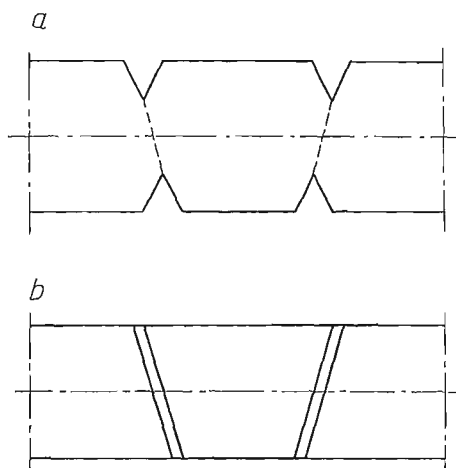
Kierunki główne prędkości nachylone są do kierunku szyjki pod kątami  $\varphi = \pi/4 \pm \psi/2$ .

Jak już wyżej wspomniano, w szyjce rozciąganych próbek, w momencie uplastycznienia pojawia się płaski stan naprężenia. W ogólnym przypadku stan ten jest statycznie niewyznaczalny, z wyjątkiem przypadku, gdy materiał jest izotropowy. Spełniony jest wówczas warunek współosiowości kierunków głównych tensorów naprężenia i prędkości

odkształcenia. Rozpatrując równowagę elementu wyciętego w szyjce otrzymamy następujące wyrażenia na naprężenia główne:

$$(11) \quad \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_0}{\cos \psi} [\sin(\theta - \psi) + \cos \theta], \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma_0}{\cos \psi} [\sin(\theta - \psi) - \cos \theta], \end{aligned} \quad \sigma_3 = 0,$$

gdzie  $\sigma_0 = P/hl$ , jest naprężeniem działającym pomiędzy brzegiem szyjki a obszarem sztywnym. Stan ten jest ważny tylko dla odpowiednio szerokiego pasma, a metoda daje dobre wyniki badania materiału tylko do chwili uplastycznienia.



Rys. 19

Dla materiału izotropowego w płaszczyźnie pasma wyznaczamy z doświadczenia kierunek nieciągłości prędkości  $V$  dla szeregu próbek o różnym nachyleniu bruzdy  $\theta$  oraz wartość siły rozciągającej w momencie uplastycznienia. Na tej podstawie obliczamy naprężenia główne, które po naniesieniu na płaszczyznę  $\sigma_1 \sigma_2$  pozwalają na weryfikację warunku plastyczności.

Możliwe jest również przeprowadzenie analizy wyników, uzyskanych tą metodą, za pomocą parametrów Lodego  $\mu$  i  $\nu$  [49].

Wadą omówionej metody jest to, że kąt  $\psi$  nie może być dany, a wynika jedynie z własności badanego materiału. Mimo to, o przydatności jej świadczy szereg prac dotyczących badania zarówno metali [3, 43–46], jak i innych materiałów [47].

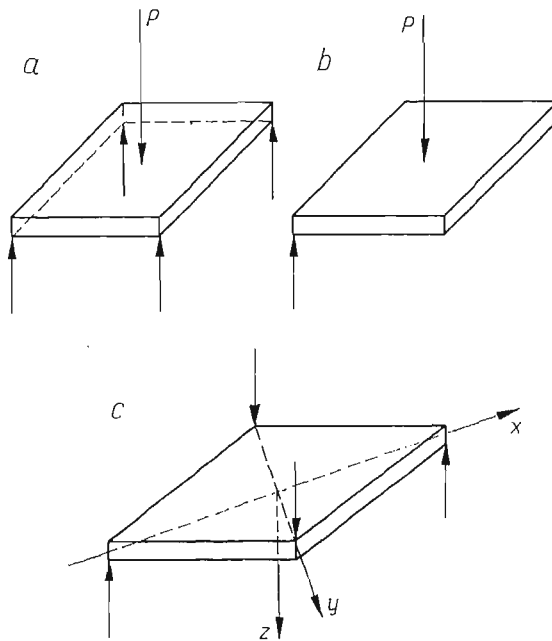
Istotnym elementem samego doświadczenia jest ustalenie kierunku względnego przesunięcia części nieuplastycznionych. W tym celu na powierzchni próbki należy nanieść siatkę rys równoległych i prostopadłych do kierunku dłuższego boku próbki. Porównanie rys siatki przed i po rozciąganiu pozwala na określenie kąta  $\psi$ . Pewne odmiany podanej metody wyznaczania wektora przemieszczenia podają prace [44, 46, 48].

Niesymetrycznie nacięte karby lub bruzdy mogą być przyczyną skręcania dwóch części sztywnych próbki. Dla uniknięcia tego niekorzystnego efektu, na próbce nacina się dwie pary osłabień, tak jak to pokazuje rys. 19.

Opisana metoda daje dobre wyniki przede wszystkim przy badaniu powierzchni plastyczności materiału wyjściowego, ale BARAYA i PARKER [46] wykazali, że może ona być stosowana również do opisu wtórnych powierzchni płynięcia materiałów po plastycznym odkształceniu.

#### 5.7. Badanie powierzchni płynięcia metodą zginanych płyt

Metoda badania powierzchni plastyczności, oparta na teorii płyt, została podana w pracy THEOCARISA i HAZELLA [52]. Zaletą tej metody jest to, że pozwala na badanie kształtu powierzchni w całej dwuwymiarowej płaszczyźnie naprężeń głównych. Badania przeprowadza się na płytach równoległobocznych poddawanych działaniu kombinacji



Rys. 20

momentów zginających. Do wyznaczenia punktów w drugiej i czwartej ćwiartce płaszczyzny momentów zginających używa się płyt równoległobocznych, zginanych dwoma parami sił przyłożonych w narożnikach. Wyznaczanie punktów w pierwszej i trzeciej ćwiartce jest bardziej złożone. Polega na superpozycji wyników badań: płyty kwadratowej podpartej w czterech narożnikach i obciążonej w środku oraz płyty kwadratowej podpartej w dwóch przeciwległych narożnikach i obciążonej w środku.

Na rys. 20 pokazano trzy różne sposoby obciążania płyt równoległobocznych do badania całej powierzchni plastyczności w płaszczyźnie głównych momentów zginających.

Metoda pozwala na badanie powierzchni plastyczności zarówno materiału wyjściowego, jak i po wstępnym odkształceniu plastycznym.

Płyty o różnej geometrii, poddawane różnym sposobom obciążenia, znajdują się w różnych warunkach płaskiego stanu naprężenia. Metoda jakkolwiek bardzo prosta jest obar-



czona pewną niedoskonałością. Wynika ona stąd, że zginanie wytwarza na grubości płyty nierównomierny rozkład naprężeń. Dlatego też, uzyskane wyniki dostarczają informacji o względnych kształtach powierzchni plastyczności, a nie o jej absolutnych rozmiarach. Badania krzywych płynięcia, zarówno materiału wyjściowego, jak i po wstępnym odkształceniu plastycznym, przeprowadza się na płytach o tej samej grubości.

Wytnijmy z płyty prostokątnej równoległobok utworzony przez linie łączące środki boków prostokąta. Powierzchnię siodłową dla tego równoległoboku otrzymamy wówczas, gdy obciążymy go w narożnikach dwiema parami sił skupionych i przeciwnie skierowanych. W wyniku takiego obciążenia, na bokach równoległoboku pojawiają się równomiernie rozłożone momenty skręcające, które wywołują zginanie. Taka równoległoboczna płyta, obciążona w narożnikach przeciwnie skierowanymi parami sił skupionych (rys. 20c), jest próbką przeznaczoną do badania drugiej i czwartej ćwiartki dwuwymiarowej płaszczyzny głównych momentów zginających. Przez zmianę stosunku przekątnych rombu uzyskuje się różne kombinacje głównych momentów zginających w drugiej i czwartej ćwiartce.

Do badania granicy plastyczności w pierwszej i trzeciej ćwiartce płaszczyzny głównych momentów zginających należy używać płyt kwadratowych podpartych w narożnikach i obciążonych siłą skupioną w środku (rys. 20a i 20b).

Istotnym elementem badań w tej metodzie są pomiary ugięć płyt. Interesujący sposób tych pomiarów metodą Moire przedstawił THEOCARIS [53]. Został on zastosowany przez THEOCARISA i HAZELLA [52] do badania powierzchni plastyczności aluminium w stanie wyjściowym i po plastycznym odkształceniu.

#### Literatura cytowana w tekście

1. S. KATARZYŃSKI, S. KOCAŃDA, M. ZAKRZEWSKI, *Badanie własności mechanicznych metali*, WNT, Warszawa 1967.
2. G. J. TAYLOR, H. QUINNEY, *The plastic distortion of metals*, Phil. Trans. Roy. Soc., A 230 (1931), 323–362.
3. G. LIANIS, H. FORD, *An experimental investigation of the yield criterion and the stress-strain law*, J. Mech. Phys. Solids, 3, 5 (1957).
4. S. ERBEL, *Metodyka wyznaczania krzywej umocnienia dla bardzo dużych odkształceń*, Mechanik, 10 (1966).
5. Z. MARCINIAK, *Influence of the sign change of the load on the strain hardening curve of a copper test piece subject to torsion*, Arch. Mech. Stosow., 6 (1961), 743–752.
6. J. LITOŃSKI, *Nowa metoda wyznaczania krzywej naprężenie — odkształcenie przy ścinaniu*, Rozpr. Inż., 19, 3 (1971), 485–500.
7. Z. MARCINIAK, *Badanie wpływu wstępnych odkształceń plastycznych na przebieg wzmocnienia metali metodą rozciągania niejednorodnych próbek*, Prace IPPT PAN, Warszawa 45/1971.
8. J. MIASTKOWSKI, W. SZCZEPIŃSKI, *Doświadczalne badania powierzchni plastyczności wstępnie odkształconego mosiądzu*, Mech. Teoret. Stosow., 3, 2 (1965), 55–66.
9. J. MIASTKOWSKI, *Wpływ historii obciążenia na powierzchnię plastyczności (część druga)*, Mech. Teoret. Stosow., 6, 1 (1968), 3–31.
10. K. TURSKI, *Badanie wpływu odkształcenia plastycznego na zachowanie się metalu przy różnych drogach wtórnego obciążenia*, Mech. Teoret. Stosow., 9, 1 (1971), 155–199.
11. R. MARJANOWIČ, *Ponašanje površina tečenja pri složenom cikličnom naprezanju (Behaviour of yield surface under complex cyclic loading, in Serbian)*, Doktorska Disertacija, Univerzitet u Beogradu, Bor, Jugoslavija, 1970.
12. J. MIASTKOWSKI, *Wpływ historii obciążenia na powierzchnię plastyczności*, Praca doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1966.

13. E. SHIRATORI, K. IKEGAMI, K. KANEKO, *Subsequent yield surface determined in consideration of the Bauschinger effect*, Internat. Symposium on Foundation of Plasticity, Warsaw, 1972, Nordhoff Internat. Publishing-Groningen.
14. W. N. FINDLEY and A. GJELSVIK, *A bi-axial testing machine for plasticity, Creep or relaxation under variable principal — stress ratios*, Proceedings, Am. Soc. for Testing and Materials, 1962.
15. P. M. NAGHDI, F. ESSENBERG and W. KOFF, *An experimental study of initial and subsequent yield surfaces in plasticity*, Journal of Appl. Mech., **25**, 2 (1958).
16. P. M. NAGHDI and J. C. ROWLEY, *An experimental study of biaxial stress-strain relations in plasticity*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, **3** (1954) 63–80.
17. A. PHILLIPS, *Combined tension-torsion tests for aluminium alloy 2S-O*, Journal of Appl. Mechanics, Trans. ASME, **74** (1952) 496–500.
18. M. FEIGEN, *Inelastic behavior under combined tension and torsion*, Proc. of the 2nd U.S. Nat. Congr. of Appl. Mech., 1954.
19. E. A. DAVIS, *Combined tension-torsion tests with fixed principal directions*, Journal Appl. Mechanics, **22**, 3 (1955).
20. S. S. GILL and J. PARKER, *Plastic stress-strain relationships — Some experiments on the effect of loading path and loading history*, Journal of Appl. Mechanics, March, 1959.
21. J. F. BRATT and Ö. KANAN, *Determination of the yield condition in the third quadrant of the stress plane*, Journal of Appl. Mechanics, Series E, **33**, 1 (1966).
22. S. SMITH and B. O. ALMROTH, *An experimental investigation of plastic flow under biaxial stress*, Journal of the Society for Exper. Stress Analysis, Exper. Mechanics, **10**, 6 (1970).
23. Z. GABRYSZEWSKI, *Zmiana funkcji plastyczności w procesie obciążania*, Dysertacja doktorska, Politechnika Wroclawska, 1962.
24. R. ŻUCHOWSKI, *Wpływ skręcania na wtórne rozciąganie stali*, Zeszyty Naukowe Politechniki Wroclawskiej, Mechanika X, nr 73, Wroclaw 1963, s. 101–117.
25. W. SZCZEPIŃSKI, *On the effect of plastic deformation on yield condition*, Arch. Mech. Stosow., **15**, 2, (1963), 275–296.
26. W. SZCZEPIŃSKI and J. MIASTKOWSKI, *An experimental study of the effect of the prestraining history on the yield surfaces of an aluminium alloy*, J. Mech. Phys. Solids, **16** (1968) 153–162.
27. J. MIASTKOWSKI, *Doświadczalne badania efektu pamięci wstępnie odkształconego materialu*, Prace IPPT PAN, Warszawa 62/1972.
28. О. Г. СЕМУШКИН, *Механические испытания металлов*, Изд. «Высшая Школа», Москва 1972.
29. Л. М. КАЧАНОВ, *Об экспериментальном определении последующих поверхностей нагружения и эффекта Баушингера*, Исследования по упруг. и пластичности, сб. 8, Изд. ЛГУ, 1971.
30. Л. М. КАЧАНОВ, *К вопросу об экспериментальном построении поверхностей текучести*, Изв. АН СССР, Механика Твёрдого Тела, **4** (1971).
31. Б. А. АВДЕЕВ, *Испытательные машины и приборы*, Москва, Машигиз, 1957.
32. А. А. ИЛЮШИН и В. С. ЛЕНСКИЙ, *Сопротивление материалов*, М., Физматгиз, 1959.
33. И. С. БОГАТЫРЕВ, А. А. ИЛЮШИН, В. С. ЛЕНСКИЙ и В. М. ПАНФЕРОВ, *Машина СН для исследования пластического деформирования металлов при сложном нагружении*, Инж. Журнал, **1** (1961).
34. F. von GÖLER, G. SACHS, Zs. Physik, **56** (1929) 495.
35. E. SCHMID, G. WASSERMANN, Metallwirtschaft, **10** (1931) 409.
36. J. КЛЕПАЧКО, *О релакс при упругом деформировании анизотропных металлов*, Mech. Teoret. Stosow., **7**, 2 (1969).
37. W. TRUSZKOWSKI, *Zagadnienia anizotropii zgniecionych metali polikrystalicznych*, Arch. Hutn., **1**, 2 (1956).
38. K. SAITO and H. IGAKI, *Anisotropy produced by plastic deformation*, Proc. First Japan Congr. Test. Materials, Kyoto 1958, 111–114.
39. A. BERIO, L. BORTOLOTTI, P. MANCA, A. PAGLIETTI, *On the plastic behaviour of time dependent materials. Theoretical and experimental investigation*, Arch. of Mech., **24**, 3 (1972), 351–361.
40. E. SHIRATORI and K. IKEGAMI, *A new biaxial tensile testing machine with flat specimens*, Bull. Tokyo, Inst. Technol., **82** (1967), 105–118.

41. A. KRISCH, W. WERNER, *Zugversuche im nahezu dreiaxial gleichem Spannungszustand*, Materialprüfung, 5, 10 (1963).
42. P. B. BOWDEN, J. A. JUKES, *The plastic yield behaviour of polymethacrylate*, J. Mat. Sci., 3 (1968), 183.
43. P. P. BIJLARD, Pub. Inst. Ass. Bridge and Structural Engrs., 6, 27 (1940).
44. B. B. HUNDY, A. P. GREEN, *A determination of plastic stress-strain relations*, J. Mech. Phys. Solids, 3 (1954), 16.
45. J. P. ELLINGTON, *An investigation of plastic stress-strain relationships using grooved tensile specimens*, J. Mech. Phys. Solids, 7 (1958), 276.
46. G. L. BARAYA, J. PARKER, *Determination of yield surfaces by notched strip specimens*, Int. J. Mech. Sci., 5 (1963), 353–363.
47. A. DRESCHER, *O pewnej metodzie wyznaczania kryterium zniszczenia polimerów*, Mech. Teoret. Stosow., 7, 3 (1969).
48. G. L. BARAYA, J. PARKER and J. W. FLOWETT, *Mechanical and photographic processes for producing a grid of lines*, Int. J. Mech. Sci., 5 (1963), 365–367.
49. R. HILL, *Mathematical theory of plasticity*, p. 18, Clarendon Press, Oxford 1950.
50. R. HILL, *On discontinuous plastic states with special reference to localized necking in thin sheets*, J. Mech. Phys. Solids, 1 (1952), 19–30.
51. R. HILL, *A new method for determining the yield criterion and plastic potential of ductile metals*, J. Mech. Phys. Solids, 2 (1953), 272.
52. P. S. THEOCARIS and C. R. HAZELL, *Experimental investigation of subsequent yield surfaces using the moire method*, J. Mech. Phys. Solids, 13 (1965), 281–294.
53. P. S. THEOCARIS, *Moire method in plates*, Proc. IASS Symp., Warsaw 1963.
54. П. П. ПЕТРИЦЕВ, *Упруго-пластические деформации анизотропного тела*, Вестник МГУ, 8 (1952).
55. Е. К. АШКЕНАЗИ, *Построение предельных поверхностей для плоского напряженного состояния анизотропных материалов по экспериментальным данным*, Заводская Лаборатория, 2 (1964).
56. П. Г. МИКЛЯЕВ, Я. Б. ФРИДМАН, *Об оценке механических свойств и характера разрушения анизотропных металлов*, Заводская Лаборатория, 2 (1966).
57. М. Л. ГОРЬ, Д. М. КАРПИНОС, А. А. ОСТРОВСКИЙ, *Исследование влияния предварительной пластической деформации на вид кривых текучести*, Проблемы Прочности, 6 (1970).
58. В. Л. АХРЕМЕНКО, И. А. КОЗЛОВ, *К исследованию двухосного растяжения на плоских образцах*, Заводская Лаборатория, 8 (1968).
59. В. А. БАЛДИН, В. А. ГЕММЕРЛИНГ, В. И. ТРОФИМОВ, *Экспериментальное исследование упруго-пластической работы малоуглеродистой стали при простом и сложном нагружении*, Тр. ЦНИПС, Исследования по стальным конструкциям, Госстройиздат, Москва 1956.
60. В. А. БАЛДИН, В. И. ТРОФИМОВ, *Экспериментальное исследование условия текучести строительной стали на плоских образцах*, Изв. АН СССР ОТН, 3 (1958).
61. Г. А. СОЛНЦЕВА, Ю. И. ЯГН, *Реверсер для испытаний материалов на трехосное сжатие*, Заводская Лаборатория, 3 (1959).
62. М. Л. ГОРЬ, А. А. ОСТРОВСКИЙ, *Приспособление для двухосного растяжения крестовидных образцов*, Проблемы Прочности, 6 (1970).
63. М. Л. ГОСЬ, А. А. ОСТРОВСКИЙ, *Приспособления и устройства для исследования механических свойств материалов*, Изд. «Наукова Думка», Киев 1973.

#### Резюме

#### МЕТОДИКА СТАТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ МЕТАЛЛОВ

В работе представлена методика статических экспериментальных исследований пластических деформаций металлов при сложном нагружении. Особенное внимание уделяется исследованию поверхности текучести в плоском напряженном состоянии осуществляемом для плоских и трубчатых образцов.

## S u m m a r y

## METHODS OF STATIC EXPERIMENTAL STUDIES OF PLASTIC FLOW OF METALS

Methods of quasi-static experiments of plastic flow of metals under complex loading are presented. Attention is paid mainly to the investigations of yield surfaces in plane stress conditions performed on flat or tubular specimens.

INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

*Praca została złożona w Redakcji dnia 23 sierpnia 1974 r.*

---