

DOŚWIADCZALNE BADANIE POWIERZCHNI PLASTYCZNOŚCI WSTĘPNIE
ODKSZTAŁCONEGO MOSIĄDZU

J. MIASTKOWSKI, W. SZCZEPIŃSKI (WARSZAWA)

1. Wstęp

Warunkiem plastyczności dla metali w stanie wyżarzonym znajdującym bardzo dobre potwierdzenie doświadczalne jest warunek Hubera-Misesa

$$(1.1) \quad s_{ij}s_{ij} = K^2,$$

gdzie s_{ij} jest dewiatorem naprężenia, a K — stałą materiału. Dla rzeczywistych metali, wykazujących wzmocnienie, warunek ten przestaje obowiązywać natychmiast po pojawieniu się w procesie obciążenia nawet małych odkształceń plastycznych. Zjawisko wzmocnienia wskazuje na rozszerzanie się początkowej powierzchni plastyczności opisanej równaniem (1.1) w przestrzeni naprężeń. Jednocześnie efekt Bauschingera powoduje, że rozszerzanie to nie może być symetryczne.

Pewną próbę matematycznego ujęcia tych złożonych zjawisk stanowi teoria J. I. KADASZEWICZA i W. W. NOWOŻYŁOWA [1], podająca następującą postać warunku plastyczności materiału odkształconego plastycznie

$$(1.2) \quad (s_{ij} - 2ge_{ij}^p)(s_{ij} - 2ge_{ij}^p) = C,$$

gdzie g jest pewną funkcją niezmienników tensora odkształcenia plastycznego e_{ij}^p , zaś C — funkcją niezmiennika

$$\lambda = \int (s_{ij} - 2ge_{ij}^p) de_{ij}^p.$$

Powierzchnia plastyczności w przestrzeni naprężeń opisana zależnością (1.2) ulega w czasie procesu odkształcania plastycznego równomiernemu rozszerzeniu, z zachowaniem podobieństwa geometrycznego, oraz jednoczesnemu przesunięciu bez obrotu. Zbliżoną w ujęciu teorię przedstawił również T. LEHMAN [2].

Wcześniejszą od powyższej koncepcji próbę podjął A. J. ISZLIŃSKI [3], proponując warunek plastyczności w postaci

$$(1.3) \quad (s_{ij} - He_{ij}^p)(s_{ij} - He_{ij}^p) = K^2,$$

gdzie H jest stałą. Analogiczny warunek plastyczności został podany przez R. SHIELDA i H. ZIEGLERA [4] w oparciu o koncepcje W. PRAGERA [5]. Stałość wielkości K wskazuje, że powierzchnia plastyczności nie zmienia swych wymiarów, a jedynie przesuwana się bez obrotu w przestrzeni naprężeń.

Najstarsza koncepcja wzmocnienia zakłada jedynie równomierne rozszerzenie początkowej powierzchni plastyczności, co odpowiada uzależnieniu stałej K w zależności (1.1) od pracy wykonanej na odkształceniach plastycznych

$$K = K\left(\int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p\right).$$

Doświadczalna weryfikacja różnych koncepcji teoretycznego ujęcia bardzo złożonego zjawiska wzmocnienia przeprowadzana jest niemal wyłącznie w płaskim stanie naprężenia, jaki daje się zrealizować w cienkościennych rurkowych próbkach, obciążonych różnymi kombinacjami siły osiowej, momentu skręcającego i ciśnienia wewnętrznego. Wobec tego, że metale odkształcone plastycznie wykazują przy odciążaniu lub powtórny obciążeniu bardzo łagodne przejście od odkształceń sprężystych do plastycznych, zachodzi konieczność jednoznacznej definicji powierzchni plastyczności. W pracach doświadczalnych J. I. JAGNA i O.A. SZYSZMARIĘWA [6] oraz W. SZCZEPIŃSKIEGO [7] wykazano, że definicja taka ma zasadniczy wpływ na kształt powierzchni. Powierzchnie odpowiadające nawet bardzo małej intensywności plastycznych odkształceń postaciowych przy powtórny obciążeniu ($\epsilon_f^p = 0.01\%$) znacznie różnią się od powierzchni, odpowiadającej granicy proporcjonalności. Dla $\epsilon_f^p = 0,1\%$ powierzchnie te różnią się w sposób zasadniczy. Utożsamianie powierzchni plastyczności z powierzchnią proporcjonalności, jak to przyjęto w pracach [8 i 9], nie może opisać rzeczywistych własności plastycznych wstępnego odkształconego metalu, gdyż na powierzchni tej odkształcenia plastyczne są pomijalnie małe w porównaniu ze sprężystymi. Wzajemny stosunek plastycznej i sprężystej części odkształcenia szczegółowo zbadano w ramach niniejszej pracy, stwierdzając, że jest on równy w przybliżeniu jedności dla powierzchni określonej wielkością $\epsilon_{ij}^p = 0,01\%$. Dla $\epsilon_f^p = 0,02\%$ część plastyczna odkształcenia jest już kilkakrotnie większa od sprężystej.

Mimo, że we wspomnianych wyżej pracach doświadczalnych droga wstępnego obciążenia powyżej początkowej granicy plastyczności była bardzo prosta (jednoosiowe rozciąganie lub czyste skręcanie), to wykazały one bardzo złożony charakter zmiany kształtu powierzchni plastyczności, nie dający się opisać żadną z wyżej podanych zależności teoretycznych. W niniejszej pracy zastosowano złożoną drogę obciążania stwierdzając, że oprócz zmiany kształtu i przesunięcia powierzchnia odpowiadająca granicy proporcjonalności może doznawać obrotu, czego również nie uwzględniają powyższe hipotezy.

2. Próbk i aparatura

Próbki rurkowe wykonane zostały z ciągniętej rury z mosiądzu M63 z zawartością 37% cynku. Średnica wewnętrzna rury wynosiła 30 mm, a grubość ścianki 1 mm. Z rury tej odcinano odcinki o długości 180 mm, których końce rozłaczano stożkowym trzpieniem o kącie wierchołkowym 90° w celu utworzenia kołnierzy służących do zamocowania w urządzeniu badawczym. Dla wyeliminowania wpływu poprzedniej historii odkształcenia związanej z procesem ciągnięcia rury w hucie, wszystkie próbki zostały wyżarzone w temperaturze 650°C w ciągu 2 godzin. Stu-

dzenie odbywało się wraz z piecem do temperatury 200°C w ciągu 20 godzin. Następnie próbki wyjmowano z pieca i dalsze ochładzanie do temperatury otoczenia odbywało się na powietrzu. Do badań wybrano drogą selekcji tylko te próbki, które miały prawidłowy przekrój kołowy oraz możliwie równomierny rozkład grubości ścianki zarówno wzdłuż tworzących, jak i po obwodzie. Pomiary grubości przeprowadzono na specjalnym przyrządzie z wbudowanym czujnikiem zegarowym o dokładności odczytu 0,001 mm. W wybranych próbkach największa różnica w grubości ścianki nie przekraczała 3% jej wartości średniej.

Stanowisko badawcze wyposażono w dwa niezależne hydrauliczne układy obciążające. Jeden z nich wywoływał w próbce osiowe naprężenie rozciągające za pomocą trzpienia zakończonego tłokiem. Dolny koniec próbki zamocowany był w obudowie przyrządu, a górny sztywno uchwycony wraz z trzpieniem. Przegub kulisty pomiędzy trzpieniem a tłokiem zapobiegał powstawaniu momentu zginającego w próbce. Drugi układ obciążający doprowadzał olej pod ciśnieniem do wnętrza próbki wywołując w niej naprężenia obwodowe. Niezależność obydwu układów obciążających pozwala realizować dowolną drogę obciążania na płaszczyźnie: naprężenie obwodowe σ_t — naprężenie osiowe σ_z .

Odkształcenia mierzono za pomocą elektrycznych tensometrów oporowych o długości pomiarowej 15 mm naklejanych na zewnętrzną powierzchnię próbek w środku ich długości. Dla wyeliminowania wpływu ewentualnej małej mimośrodowości obciążenia tensometry naklejano po dwa symetrycznie po przeciwnych stronach próbki w obu głównych kierunkach osiowym i obwodowym. Wielkość odkształcenia wyznaczano jako średnią ze wskazań obu tensometrów jednakowo skierowanych. Odczytów dokonywano na mostku tensometrycznym o podziale skali odpowiadającej odkształceniu $\varepsilon = 5 \times 10^{-5}$.

3. Sposób obciążania i metoda opracowania wyników

Ogółem zbadano 28 próbek w czterech seriach po siedem sztuk każda. Próbki pierwszej serii nie były wstępnie odkształcane i zostały przeznaczone do zbadania kształtu początkowej powierzchni plastyczności materiału. Pozostałe trzy serie poświęcono zbadaniu zmiany kształtu powierzchni plastyczności, wywołanej uprzednim odkształceniem plastycznym. Zarówno zastosowane drogi obciążania, jak i uzyskane wyniki zostaną przedstawione w pierwszej ćwiartce płaszczyzny naprężeń σ_z, σ_t , gdzie σ_z oznacza naprężenie w kierunku osiowym, a σ_t — naprężenie w kierunku obwodowym próbki. Dla każdej próbki w czasie obciążania rejestrowano odkształcenia osiowe ε_z i obwodowe ε_t , odpowiadające określonym naprężeniom osiowym i obwodowym. Po przyłożeniu odpowiednio małego przyrostu obciążenia utrzymywano jego stałą wartość przez okres 5 minut i dopiero wtedy odczytywano wskazania tensometrów, natychmiast bowiem po wzroście obciążenia materiał wykazywał znaczny ciągły przyrost odkształceń przy stałej wartości naprężeń. Odkształcenia te ustalały się nie wykazując dalszego wzrostu dopiero po okresie około 2—4 minut w zależności od poziomu naprężeń. Dla ujednoczenia wszystkich pomiarów odczytywano wielkość odkształceń po 5-cio minutowym okresie wyczekiwania.

Każda z próbek jednej serii była inaczej obciążana wzdłuż drogi proporcjonalnego obciążania, odpowiadającej jednej z linii prostych poprowadzonych na płaszczyźnie naprężeń z początku układu 0. Założone drogi obciążania zaznaczono cienkimi liniami na rysunkach 4 ÷ 8. Ze względów technicznych rzeczywiste drogi obciążania odbiegały nieco od teoretycznych prostych proporcjonalnego obciążania. Kolejno zwiększano mianowicie małymi skokami wielkość siły osiowej i ciśnienia wewnętrznego, przy czym przy wzroście siły osiowej utrzymywano stałą wartość ciśnienia wewnętrznego i odwrotnie. Jednakże największe odchylenie od prostej proporcjonalnego obciążania nie przekroczyło wielkości 0,3 kG/mm².

Z otrzymanych wielkości przyrostów odkształceń $\Delta \varepsilon_t$ i $\Delta \varepsilon_z$, odpowiadających kolejno przebytnym odcinkom na drodze obciążania, określonym przyrostami naprężeń $\Delta \sigma_t$ i $\Delta \sigma_z$ obliczano następnie przyrost intensywności odkształceń postaciowych

$$\Delta \varepsilon_i = \sqrt{\frac{1}{6} [(\Delta \varepsilon_t - \Delta \varepsilon_z)^2 + (\Delta \varepsilon_z - \Delta \varepsilon_h)^2 + (\Delta \varepsilon_h - \Delta \varepsilon_t)^2]}$$

gdzie $\Delta \varepsilon_h$ oznacza przyrost odkształcenia po grubości ścianki próbki. Wobec wielkich trudności jakie przedstawia pomiar zmiany grubości ścianki w czasie procesu obciążania, wielkości $\Delta \varepsilon_h$ nie mierzono, ale obliczano ją przyjmując warunek nieściśliwości materiału

$$\Delta \varepsilon_z + \Delta \varepsilon_t + \Delta \varepsilon_h = 0.$$

Następnie obliczano intensywność odkształceń postaciowych ε_i w poszczególnych momentach procesu obciążania, sumując przyrosty $\Delta \varepsilon_i$ od początku obciążania.

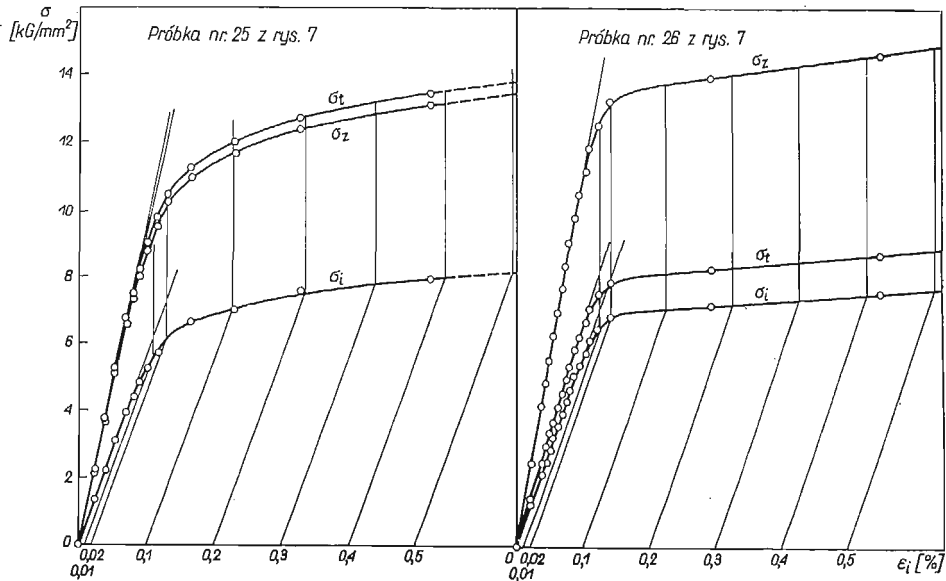
Z kolei obliczano intensywność naprężeń stycznych

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_h)^2 + (\sigma_h - \sigma_t)^2]}$$

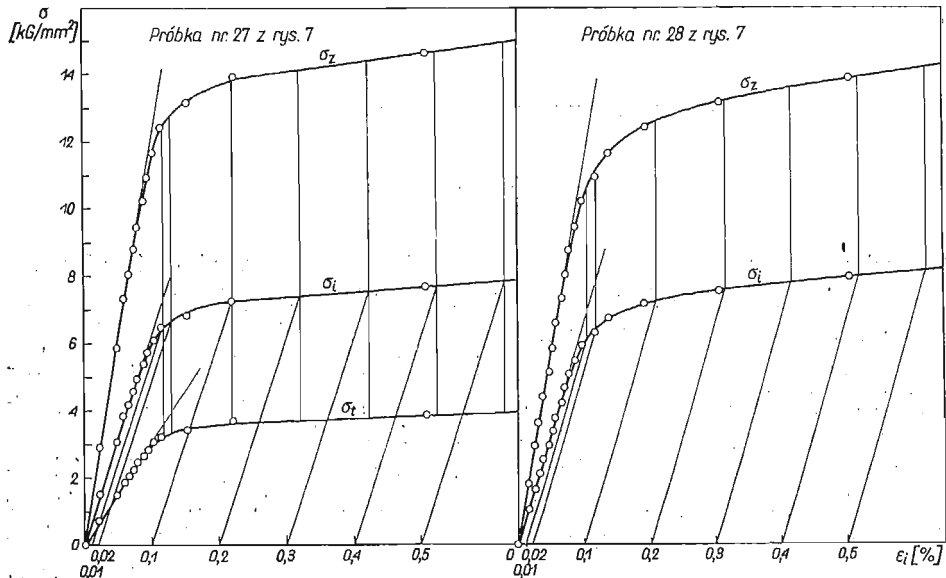
gdzie σ_h oznacza naprężenie ściskające, skierowane po grubości ścianki i wywołane ciśnieniem oleju p działającym wewnątrz próbki. Wielkość tego naprężenia nie jest stała wzdłuż grubości ścianki i zmienia się od wartości $\sigma_h = -p$ na promieniu wewnętrznym do $\sigma_h = 0$ na promieniu zewnętrznym. W obliczeniach przyjęto średnią wartość tego naprężenia $\sigma_h = -p/2$.

Po obliczeniu wielkości σ_i i ε_i sporządzano dla każdej próbki wykres $\sigma_i(\varepsilon_i)$: Dla przykładu na rys. 1 i 2 pokazano takie krzywe, otrzymane dla kilku próbek z czwartej serii, dla której ostateczne wyniki przedstawiono dalej na rys. 7. Obok krzywych $\sigma_i(\varepsilon_i)$ naniesiono na tych samych rysunkach krzywe $\sigma_t(\varepsilon_i)$ i $\sigma_z(\varepsilon_i)$. Z punktów na osi ε_i , odpowiadających wartościom $\varepsilon_i^p = 0,01; 0,02; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ i 0,5% poprowadzono proste równoległe do początkowego prostoliniowego odcinka krzywej $\sigma_i(\varepsilon_i)$. Punkty przecięcia tych prostych z krzywą σ_i przeniesiono następnie na krzywe σ_t i σ_z znajdując w ten sposób naprężenia, które wywołały w próbce określoną intensywność trwałych (plastycznych) odkształceń postaciowych ε_i^p . Tak otrzymane wielkości naprężeń naniesiono na płaszczyźnie σ_t, σ_z (rys. 4, 5, 7) w postaci szeregu punktów położonych na wspólnej prostej, przedstawiającej drogę

obciążania danej próbki. Przez punkty należące do różnych próbek, ale odpowiadające tej samej wartości ϵ_i^p , poprowadzono następnie krzywą oznaczając ją symbolem σ z dolnym indeksem określającym stałą dla niej wielkość ϵ_i^p . Ponadto na płaszczyźnie naprężeń wyznaczano jeszcze krzywą σ_{prop} , odpowiadającą początkowi zakrzywiania się prostoliniowej wstępnej części wykresów σ_t i σ_z (por. rys. 1 i 2).



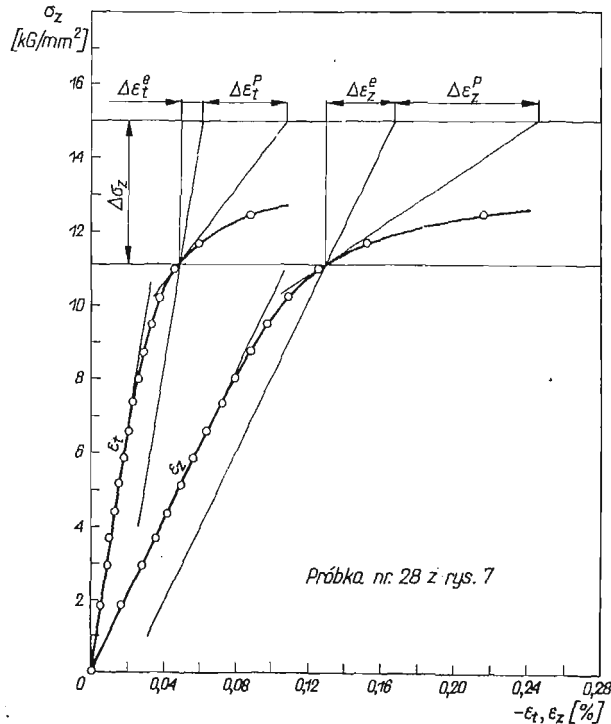
Rys. 1



Rys. 2

Należy tu jednak podkreślić, że ocena wielkości granicy proporcjonalności w dużej mierze zależy od dokładności i czułości urządzenia rejestrującego odkształcenia oraz od subiektywnej oceny prowadzącego doświadczenie.

Dla krzywych σ_{prop} , $\sigma_{0,01}$ i $\sigma_{0,02}$ wyznaczano kierunki przyrostów odkształcenia sprężystego i plastycznego. Przyrosty te pokazano na rys. 4, 5 i 7 na płaszczyźnie σ_t, σ_z w postaci wektorów, a sposób ich wyznaczania przedstawiono na rys. 3 na przykładzie próbki nr 28 z rys. 7. Podstawę do wyznaczenia tych przyrostów stanowią wykresy obydwu odkształceń ε_t i ε_z w funkcji jednego z naprężeń σ_z lub σ_t .



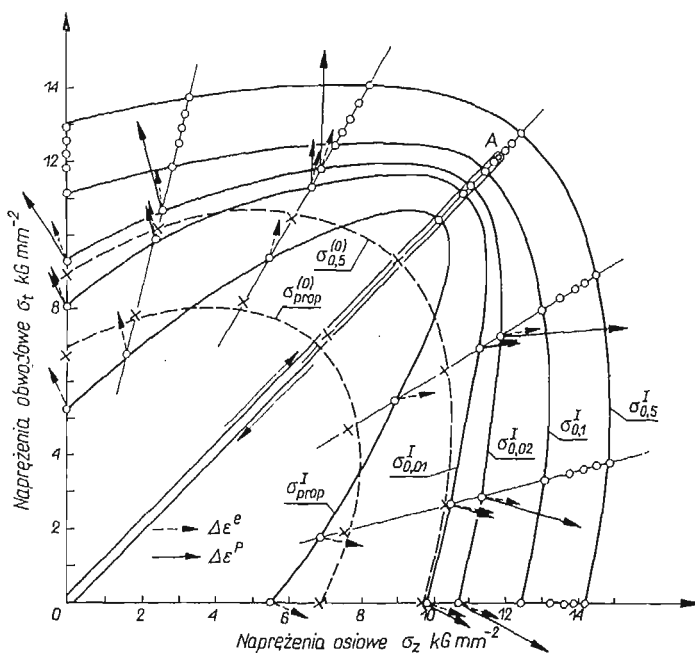
Rys. 3

Na wykresach tych w punktach, odpowiadających rozpatrywanej właśnie krzywej plastyczności (na rys. 3 podana konstrukcja dotyczy krzywej $\sigma_{0,02}$), prowadzimy trzy proste, mianowicie jedną w kierunku stycznym do krzywej, drugą równoległą do początkowego prostoliniowego odcinka krzywej, a trzecią równoległą do osi naprężeń. Przyjmując dowolny przyrost naprężenia $\Delta\sigma_z$ względnie $\Delta\sigma_t$ (na rys. 3 przyrost ten narysowany został w innej skali niż oś naprężeń) znajdujemy w sposób pokazany na rysunku odpowiadające mu składowe przyrostu sprężystej części odkształcenia $\Delta\varepsilon_t^e$, $\Delta\varepsilon_z^e$ i plastycznej części odkształcenia $\Delta\varepsilon_t^p$, $\Delta\varepsilon_z^p$. Odkładając te składowe na płaszczyźnie naprężeń odpowiednio w kierunkach osi σ_t i σ_z znajdujemy kierunki wektorów przyrostów odkształcenia sprężystego i plastycznego. We wszystkich przypadkach przyjęto ten sam moduł wektora przyrostu odkształ-

cenia sprężystego. Moduł wektora przyrostu odkształcenia plastycznego jest określony jednoznacznie przez porównanie wielkości składowych obu wektorów w sposób pokazany na rys. 3.

4. Wyniki pomiarów

Na rysunku 4 liniami przerywanymi pokazano krzywą odpowiadającą granicy proporcjonalności $\sigma_{prop}^{(0)}$ i granicy $\sigma_{0,5}^{(0)}$ otrzymaną jako wynik badania próbek bez uprzedniego odkształcenia plastycznego. Obydwie krzywe tylko nieznacznie odbiegają od teoretycznych elips Hubera-Misesa. Zaznaczone krzyżykami punkty doświadczalne wskazują, że różnice własności poszczególnych próbek są niewielkie, oraz że materiał ich można uważać za izotropowy.

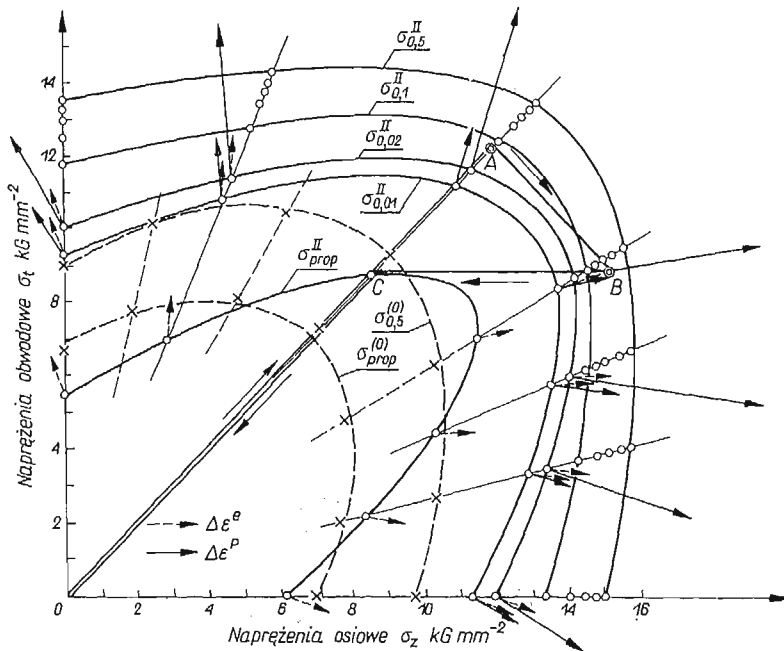


Rys. 4

Wszystkie próbki drugiej serii zostały wstępnie jednakowo odkształcone plastycznie wzdłuż drogi OA zaznaczonej na rys. 4, a następnie odciążone wzdłuż tej samej drogi od punktu A do O . Z kolei na każdej próbce naklejano tensometry i następnego dnia badano kształt powierzchni plastyczności tak odkształconego materiału. Wyniki podano na rys. 4 liniami ciągłymi. Widać zasadniczą różnicę kształtu krzywych σ_{prop}^I , $\sigma_{0,01}^I$ i $\sigma_{0,02}^I$ w stosunku do odpowiednich krzywych dla materiału nieodkształconego. Jednakże dalsze krzywe $\sigma_{0,1}^I$, $\sigma_{0,2}^I \dots$ niezbyt wiele odbiegają od elips otrzymanych przez równomierne rozszerzenie początkowych elips Hubera-Misesa. Wektory przyrostów odkształcenia plastycznego narysowane linią ciągłą na ogół są skierowane normalnie do odpowiednich powierzchni plastyczności, ale w niektórych miejscach są one dość wyraźnie odchyłone od kierunku normalnego.

Wektory przyrostów odkształcenia sprężystego pokazane linią przerywaną mają z założenia jednakową długość i pozwalają porównać wielkości plastycznej i sprężystej części odkształcenia w różnych fazach procesu odkształcania próbki. Dla krzywej σ_{prop} część plastyczna odkształcenia nie istnieje. Na krzywej $\sigma_{0,01}$ obydwa wektory, sprężysty i plastyczny, są w przybliżeniu jednakowe, a dopiero na krzywej $\sigma_{0,02}$ stwierdzamy, że odkształcenie plastyczne wyraźnie przewyższa odkształcenie sprężyste. Dla krzywej $\sigma_{0,1}$ nie pokazano już wektorów przyrostu odkształcenia, gdyż część plastyczna wielokrotnie przewyższa tu sprężystą część odkształcenia.

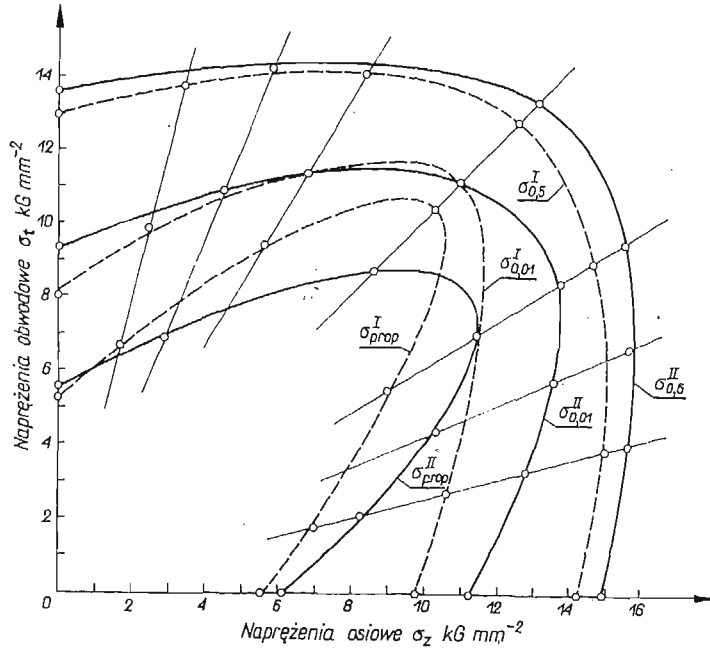
Droga wstępnego odkształcenia plastycznego wszystkich próbek trzeciej serii pokazana została na rys. 5 w postaci linii łamanej OAB, przy czym punkt *A* ma takie samo położenie jak na rys. 4. Odciażanie następowało wzdłuż łamanej BCO. Linie



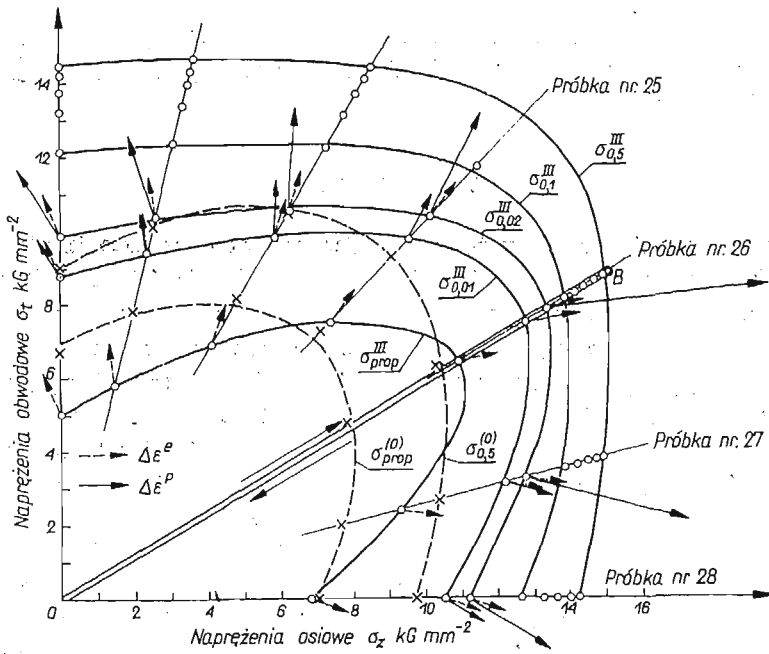
Rys. 5

ciągłe pokazują kolejne krzywe σ_{prop}^{II} , ... $\sigma_{0,5}^{II}$, otrzymane dla tak uprzednio odkształconego materiału. Rysunek 6 pozwala porównać niektóre krzywe otrzymane w drugiej i trzeciej serii. Wyraźnie widać, że dodatkowy odcinek *AB* drogi wstępnego obciążania wywołał obrót krzywej σ_{prop} bez wyraźnej zmiany jej kształtu. Krzywe $\sigma_{0,01}$, znacznie różnią się kształtem i położeniem, natomiast różnice pomiędzy krzywymi $\sigma_{0,5}$ są niewielkie.

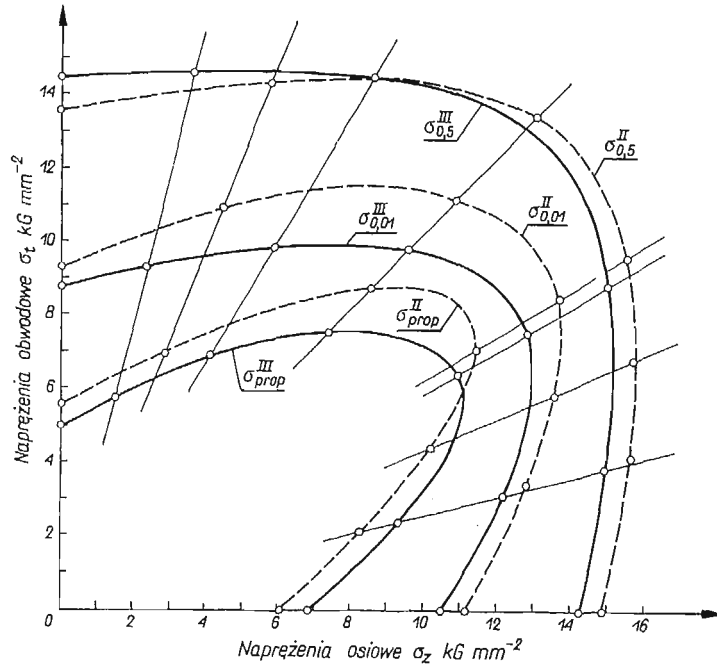
W czwartej serii wszystkie próbki zostały wstępnie odkształcone wzdłuż prosto-liniowej drogi *OB* (rys. 7), a następnie odciażone od *B* do *O*. Punkt *B* jest tak samo położony jak na rys. 5. Otrzymane krzywe pokazane na rys. 7 wykazują podobne cechy jak w obu poprzednich seriach. Ich porównanie z wynikami trzeciej serii (rys. 5)



Rys. 6



Rys. 7



Rys. 8

przeprowadzono na rys. 8. Krzywa σ_{prop}^{III} (linia ciągła) jest obrócona względem krzywej σ_{prop}^{II} (linia przerywana), mimo tego że końcowy punkt *B* dróg wstępnego obciążania był w obu przypadkach ten sam. Materiał wykazuje więc pamięć drogi, wzdłuż jakiej został osiągnięty końcowy punkt *B*. Różnice między krzywymi $\sigma_{0,5}^I$ i $\sigma_{0,5}^{II}$ są bardzo nieznaczne.

5. Wnioski końcowe

Otrzymane wyniki pokazują złożony charakter wpływu odkształcenia plastycznego na kształt powierzchni plastyczności. Granica proporcjonalności wstępnie odkształconego materiału wykazuje silną anizotropię. Anizotropia ta w miarę wzrastania wtórnych odkształceń plastycznych maleje. Stwierdzona znaczna zmiana kształtu powierzchni σ_{prop} , $\sigma_{0,01}$ i $\sigma_{0,02}$, a w szczególności obrót powierzchni σ_{prop} pokazują, że próby opisu wzmocnienia oparte na koncepcji sztywnego przesuwania i równomiernego rozszerzania początkowej powierzchni plastyczności, jak to wynika z warunków (1.2) i (1.3), nie mogą oddać rzeczywistych własności materiału. Jednak dane doświadczalne, jakimi dysponujemy, są jeszcze daleko niewystarczające dla proponowania nowych zależności. Sporne jest również zagadnienie, którą z powierzchni należy utożsamiać z powierzchnią plastyczności. Chociaż bowiem pierwsze odkształcenia plastyczne zaczynają występować po przekroczeniu już powierzchni σ_{prop} , to jednak osiągają one wielkości równe odkształceniom sprężystym dopiero na powierzchni $\sigma_{0,01}$, a są wyraźnie od nich większe dla $\sigma_{0,02}$.

Векторы прыростов одkształcenia plastycznego są na ogół normalne do odpowiednich powierzchni, ale w kilku przypadkach stwierdzono dość znaczne ich odchylenia od kierunku normalnego. Należy jednak pamiętać, że każda z powierzchni została otrzymana w wyniku pomiaru kilku próbek, które mogły mieć nieco różne własności. Mogło to wpłynąć na kształt powierzchni. Kształt powierzchni w otoczeniu osi σ_1 jest zakłócony przez wpływ trzeciego naprężenia głównego działającego wzdłuż grubości ścianki próbki.

Z przeprowadzonych badań wynika również pewien wniosek praktyczny, dotyczący projektowania rurociągów i zbiorników ciśnieniowych. Z rysunków 4, 5 i 7 widać, że odkształcony wstępnie materiał jest najsilniejszy w kierunku drogi wstępnego obciążenia. Jeżeli przewiduje się wzmocnienie materiału przez przeciążenie to powinno się ono odbywać przy takim samym rodzaju obciążenia przy jakim rurociąg lub zbiornik później pracuje.

Literatura cytowana w tekście

1. Ю. И. Кадашевич, В. В. Новожилов, *Теория пластичности, учитывающая остаточные микронапряжения*, Прикл. Мат. Мех., I, 22(1958), 78.
2. T. LEHMAN, *Ein neuer Ansatz für plastische Formänderungen mit Kaltverfestigung*, Zeitschr. Ang. Math. Mech., Heft 7/8, 38 (1958).
3. А. Ю. Ишлинский, *Общая теория пластичности с линейным упрочнением*, Укр. Матем. Ж., 3, 1954, 314.
4. R. SHIELD and H. ZIEGLER, *On Prager's hardening rule*, ZAMP, 19a (1958), 260.
5. W. PRAGER, *The theory of plasticity; a survey of recent achievements*, Proc. Inst. Mech. Engrs., 169 (1955), 41.
6. Ю. И. Ягн, О. А. Шишмарев, *Некоторые результаты исследования упругого состояния пластически растянутых образцов никеля*, ДАН СССР, 119(1958), 46.
7. W. SZCZERŃSKI, *On the effect of plastic deformation on yield condition*, Arch. Mech. Stos., 15 (1963), 275.
8. P. M. NAGHDI, F. ESSENBURG and W. KOFF, *An experimental study of initial and subsequent yield surfaces in plasticity*, J. Appl. Mech., 25 (1958), 201.
9. H. J. IVEY, *Plastic stress-strain relations and yield surfaces for aluminium alloys*, J. Mech. Eng. Sc., 3 (1961), 15.

Резюме

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЕКУЧЕСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОЙ ЛАТУНИ

Приводятся результаты экспериментального исследования влияния пластической деформации на форму поверхности текучести латуни М 63. Исследования проводились на 28-ми трубко-образных образцах, подверженных, одновременно, нагружению осевой силой и внутренним давлением. Определяются поверхности текучести для различных определений предела текучести. Для проверки условия нормальности определяются также, в пространстве напряжений, векторы приращений деформации. Кроме того для разных моментов процесса нагрузки сравниваются величины векторов упругой и пластической частей деформации.

S u m m a r y

AN EXPERIMENTAL STUDY OF YIELD SURFACES OF PRESTRAINED BRASS

Experimental results for twenty-eight tubular specimens of a M63 brass, subjected to combined biaxial tension are presented in the study of the effect of prestraining on the shape of the yield surface. Yield surfaces are found for various definitions of the yield locus. The strain increments are also shown in the stress plane in order to compare their orientation with the normality criterion. Moreover, the lengths of elastic and plastic strain increment vectors are compared at different moments of loading.

ZAKŁAD MECHANIKI OŚRODKÓW CIĄGŁYCH
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 4 stycznia 1965 r.
