

## WPLYW CYKLICZNEJ PLASTYCZNEJ DEFORMACJI NA POWIERZCHNIĘ PLASTYCZNOŚCI\*

MAREK ŚLIWOWSKI I KAROL TURSki (WARSZAWA)

W pracach eksperymentalnych, poświęconych badaniu własności materiałów przy cyklicznym deformowaniu, spotyka się dwa typowe programy obciążenia, które realizuje się utrzymując stałą amplitudę naprężeń, ewentualnie stałą amplitudę odkształceń. Każdemu z tych programów odpowiada inne zachowanie się materiału.

Cykliczne obciążenie jednoosiowe ze stałą amplitudą naprężeń może spowodować, zależnie od gatunku materiału, zmniejszenie lub wzrost maksymalnych odkształceń przy kolejnych cyklach [1]. Zjawiska te są przejawem, odpowiednio, umocnienia lub osłabienia się materiału. Jeżeli utrzymuje się stałą amplitudę odkształceń, to zależnie od własności umacniania, czy osłabiania materiału zarejestrujemy wzrost lub obniżenie naprężeń w każdym cyklu obciążania. Materiał może być również niewrażliwy na cykliczną deformację w pewnych warunkach.

Doświadczenia prowadzono głównie przy symetrycznym cyklu jednoosiowego obciążania przez rozciąganie i ściskanie, ewentualnie wahadłowe skręcanie próbki. Wyniki eksperymentów pozwoliły na opracowanie wzorów empirycznych opisujących zachowanie się różnych materiałów [2].

Badano również powierzchnię plastyczności stali 20H po kilku cyklach plastycznego skręcania ze stałą amplitudą naprężeń [3].

Problem ustatecznienia materiału wynikający z hipotezy wzmocnienia kinematycznego Shielda i Zieglera, był badany w pracy [4].

Doświadczeń w złożonym stanie naprężenia jest jednak mało, a są one obecnie bardzo potrzebne ze względu na znaczny rozwój teorii obliczania konstrukcji poddanych cyklicznym plastycznym procesom deformacji. Szczególnie interesujące jest, czy rodzaj programu cyklicznego obciążania wpływa na zachowanie się materiału w złożonym stanie naprężenia.

W niniejszej pracy porównano powierzchnię plastyczności mosiądzu odkształconego przy trzech programach jednoosiowego obciążania. Próbki były deformowane przez rozciąganie, cykliczne rozciąganie ze stałą amplitudą naprężeń oraz ze stałą wielkością odkształcenia. W tych trzech programach zachowano stałą wielkość maksymalnego naprężenia przy rozciąganiu, natomiast odkształcenia trwały różniły się znacznie.

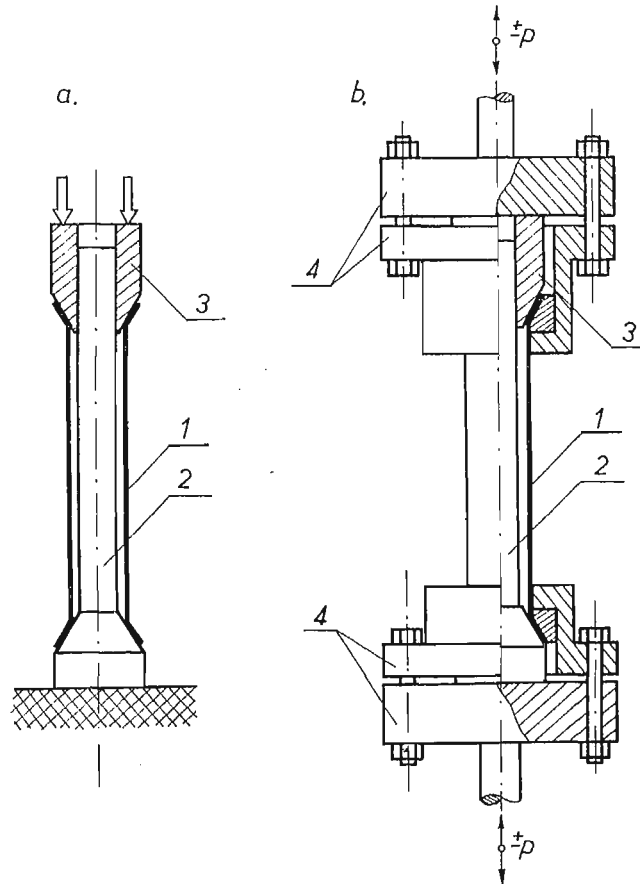
### 1. Technika doświadczalna

Badania przeprowadzono na próbkach ciętych z ciągnionej rury o średnicy wewnętrznej 30 mm i grubości ścianki 1 mm. Jako materiał stosowano mosiądz M63 w stanie wyżarzonym. Na końcach rurek wykonano kołnierze służące do umocowania próbki w uchwytach.

\* Praca została wyróżniona na konkursie na prace doświadczalne z mechaniki technicznej — zorganizowanym przez Oddział PTMTS w Krakowie w 1973 r.

W celu wykonania kołnierzy, rurkę ustawiano na stożku połączonym z trzpieniem 2, na który zakładano stożkowy śtępel 3 (rys. 1a). Całość ściskano pod prasą wykonując jednocześnie dwa kołnierze. Po tym zabiegu próbki wyżarzano przez 2 godziny w temperaturze 650°C.

Ponieważ duże odkształcenia próbek występowały tylko w kierunku osiowym przy wstępnym obciążaniu, dopuszczono do badań rurki o dosyć znacznym rozrzucie grubości



Rys. 1a). Roztłaczanie kołnierzy, b) mocowanie próbki do cyklicznego rozciągania i ściskania

ścianki wzdłuż obwodu wynoszącym  $\pm 4\%$ . Jak stwierdzono w czasie pomiarów, takie różnice grubości ścianki nie miały żadnego wpływu na odkształcenia próbek przy wstępnym obciążaniu.

W czasie cyklicznego odkształcania próbek zauważono, że początkowa granica plastyczności ma znaczny wpływ na maksymalne naprężenie w cyklu obciążania. Dlatego do badań używano tylko takie próbki, których granica plastyczności różniła się nie więcej niż  $\pm 1\%$ .

Próbki odkształcano wstępnie przez rozciąganie i ściskanie w specjalnie do tego celu wykonanych dwudzielnych uchwytach 4, dostosowanych do zrywarki o napędzie kinematycznym (rys. 1b). Uchwyty były montowane przy wykorzystaniu trzpienia służącego poprzednio do roztłaczania kołnierzy, co zapewniało osiowe ustawienie próbki.

W trakcie wstępnego obciążania, deformację osiową mierzono ekstensometrem z dwoma czujnikami zegarowymi typu MK-3 produkcji NRD.

Po wstępnym obciążaniu, próbki badano w złożonych stanach naprężenia obciążając je przez różne kombinacje siły osiowej i ciśnienia oleju wewnątrz rurki. Do tego celu służyła aparatura opisana szczegółowo w [5]. Odształcenia obwodowe  $\varepsilon_0$  i osiowe  $\varepsilon_z$  mierzono za pomocą kratowych tensometrów oporowych naklejanych na powierzchni zewnętrznej, po dwa w kierunku obwodowym i osiowym, po przeciwnych stronach próbki. Odształcenia obliczano jako średnią ze wskazań dwóch tensometrów skierowanych w ten sam sposób. Odształcenia odczytywano z dokładnością  $5 \times 10^{-6}$  za pomocą mostka tensometrycznego T-2 produkcji Politechniki Warszawskiej.

Próbki oklejone tensometrami pozostawiano na 40 godzin w celu wyschnięcia kleju. Okres ten dla wszystkich próbek był jednakowy ze względu na możliwość starzenia się materiału. Ciśnienie wewnątrz rurki oraz ciśnienie w cylindrze obciążającym próbkę siłą osiową wytwarzane było przez manometry obciążnikowe. Pozwalają one na dokładny pomiar ciśnienia, ale zmiana obciążenia musi przebiegać skokowo. Aby złagodzić skoki obciążenia próbki, wypływ oleju z manometru obciążnikowego był dławiony przez odpowiednie ustawienie zaworu odcinającego w manometrze obciążnikowym, wobec czego proces deformacji próbki trwał od kilku sekund w zakresie sprężystym do około pięciu minut w zakresie plastycznym. Po zmianie obciążenia, nowe wskazania mostka tensometrycznego rejestrowano dopiero po ustaleniu się odształcenia.

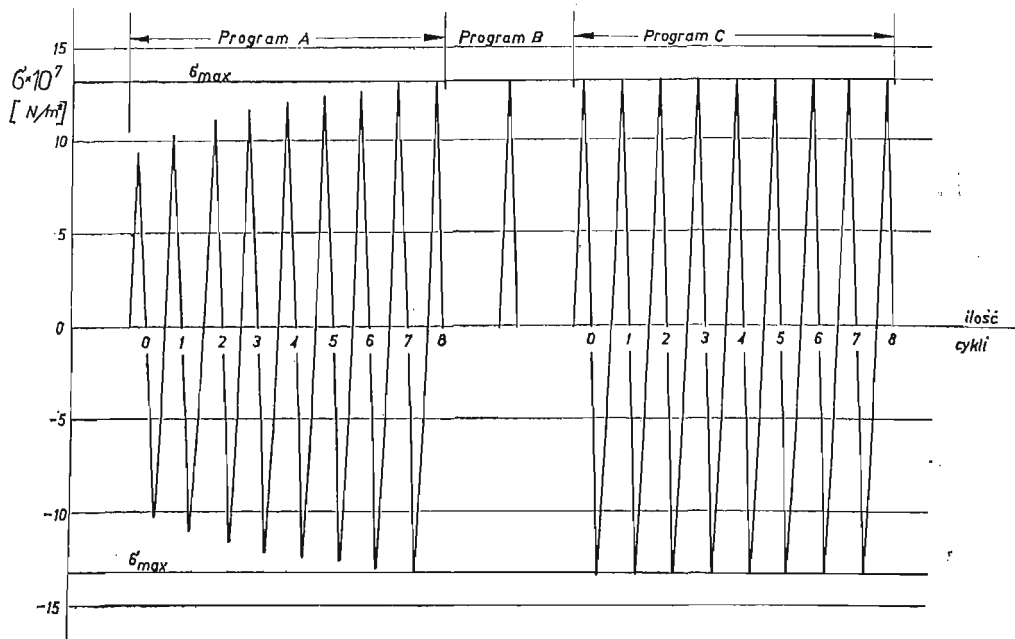
## 2. Program prób

Program prób obejmował zbadanie 21 próbek podzielonych na 3 serie po 7 próbek. Każdą serię próbek obciążano wstępnie siłą osiową według innego programu. We wszystkich programach końcowa wielkość naprężenia rozciągającego była jednakowa i wynosiła  $(13,1 \pm 0,05)10^7 \text{ N/m}^2$ .

Pierwszą serię próbek poddano cyklom rozciągania i ściskania zachowując stałą deformację około 0,62% (rys. 2, program *A*). Dodatkowym warunkiem, który postawiono w tym programie, była taka realizacja cyklicznej deformacji, żeby za każdym razem półcykl rozciągania rozpoczynał się od zerowego odształcenia. Pozwoliło to na osiągnięcie końcowego naprężenia przy znacznie mniejszych odształceniach trwałych w porównaniu z następnymi programami. Ze względu na nieliniowy wykres odciązania, nie udało się dokładnie utrzymać stałej szerokości pętli obciążania oraz trafić w początek układu współrzędnych, tym niemniej odstępstwa te są niewielkie. Po wstępnym obciążaniu przez rozciągnięcie, wykonano osiem cykli ściskania i rozciągania.

Druga seria próbek została odształcona przez jednokrotne rozciągnięcie (rys. 2, program *B*). Trwałe odształcenie próbek w części pomiarowej wynosiło 2,635%.

Próbki trzeciej serii zostały rozciągnięte tak samo, jak próbki drugiej serii, ale następnie przeprowadzono 8 cykli ściskania i rozciągania (rys. 2, program *C*). W rezultacie tego programu obciążania, końcowe odształcenie próbek wynosiło 1,978%.



Rys. 2. Program obciążeń wstępnych

Po wstępnej deformacji próbki oklejano tensometrami i deformowano wzdłuż prostoliniowych dróg obciążenia, które odpowiadają stałym proporcjom naprężeń głównych. Wyniki pomiarów służyły do określenia powierzchni plastyczności dla podanych trzech programów obciążeń wstępnych.

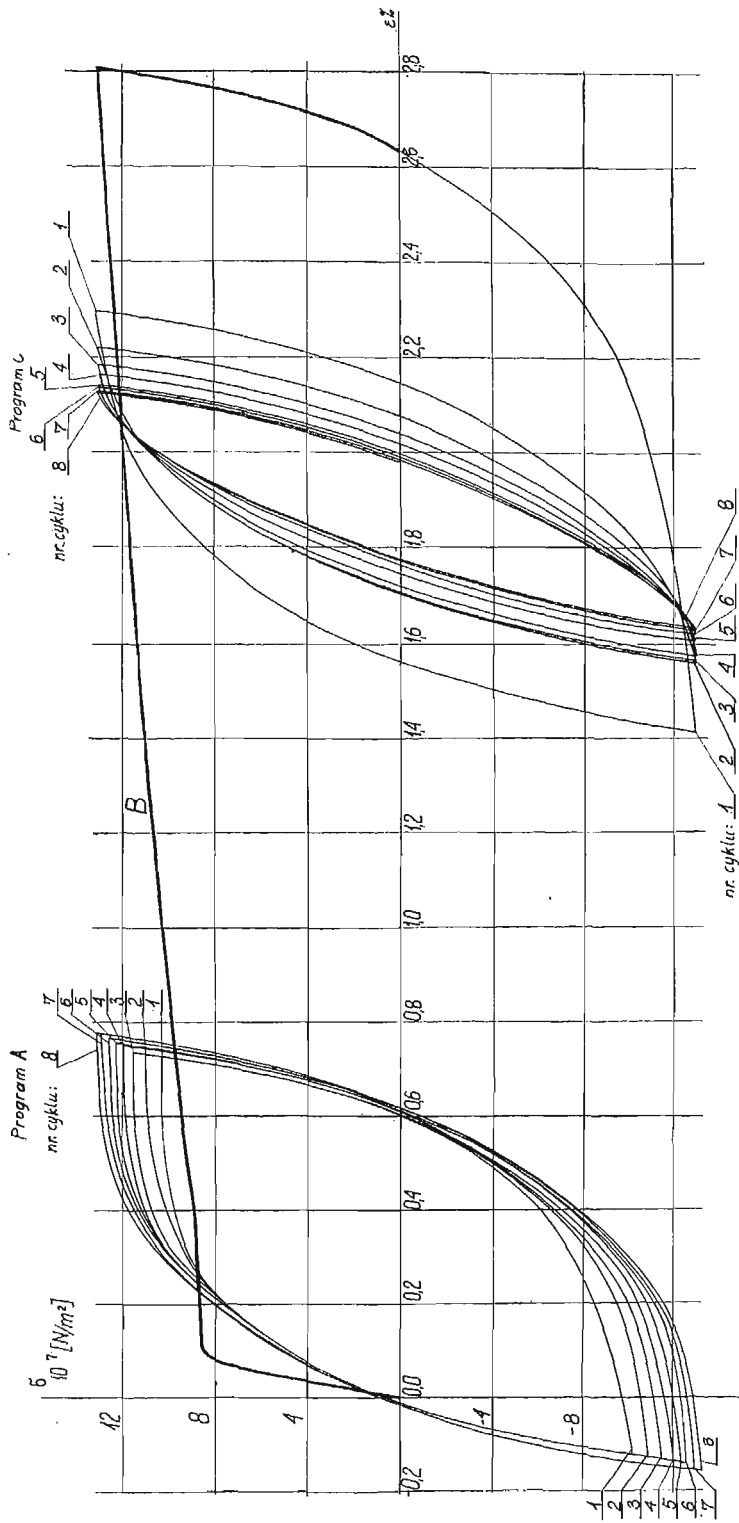
### 3. Wyniki doświadczeń przy obciążaniu wstępnym

Typowe wykresy naprężeń w funkcji odkształceń osiowych, przy wstępnym obciążaniu próbek, pokazano na rys. 3. W celu zademonstrowania różnic w trzech programach wstępnego obciążania odpowiadające im wykresy naniesiono na jednym rysunku.

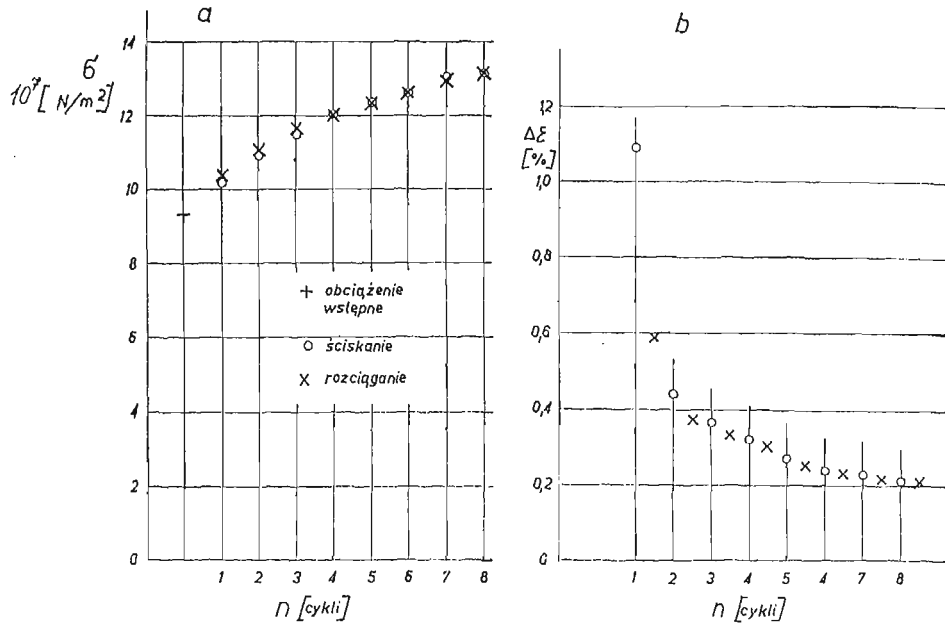
Przy deformowaniu pierwszej serii próbek otrzymano odkształcenie około 0,2%. W każdym cyklu obciążenia następował pewien przyrost maksymalnego naprężenia. Na rys. 4a przedstawiono na jednej osi współrzędnych maksymalne naprężenia przy rozciąganiu i ściskaniu, a na drugiej numer cyklu według oznaczeń z rys. 2. Okazuje się, że punkty odpowiadające temu samemu cyklowi praktycznie pokrywają się. Oznacza to, że ściskanie nie ma wpływu na maksymalne naprężenie w cyklu rozciągania, który po nim następuje. Materiał umacnia się tylko w czasie cykli rozciągania, a więc w kierunku pierwszego obciążenia.

Krzywa umocnienia przy rozciąganiu drugiej serii próbek oznaczona jest literą *B* na rys. 3. Odkształcenie trwałe wynosiło 2,635%.

Trzecia seria próbek po wstępnym rozciągnięciu poddana została cyklicznemu ściskaniu i rozciąganiu przy stałej wielkości naprężeń. Ilość cykli obciążenia w obu programach



Rys. 3. Krzywe umocnienia dla trzech programów wstępujących obciążeń: B — krzywa umocnienia przy rozciąganiu



Rys. 4a) Porównanie maksymalnych naprężeń w cyklu ściskania i rozciągania ze stałą wielkością odkształcenia; b) porównanie wielkości trwałego odkształcenia po cyklu ściskania ze stałą wielkością naprężenia maksymalnego

była taka sama. Szerokość pętli histerezy kolejnych cykli obciążania zmniejsza się stopniowo dążąc do pewnej ustalonej wartości (rys. 4b). W wyniku cyklicznego obciążania, końcowe trwałe odkształcenie zmniejszyło się w porównaniu do odkształcenia próbki rozciągniętej i wynosiło 1,978%.

#### 4. Wyniki doświadczeń przy obciążaniu wtórnym

Odształcenie obwodowe  $\epsilon_0$  oraz odkształcenie osiowe mierzono za pomocą tensometrów oporowych. Nieznana wielkość trzeciego odkształcenia głównego obliczano z warunku nieściśliwości. Znając siłę osiową i ciśnienie  $p_0$  wewnątrz rurki obliczano naprężenie osiowe i obwodowe. Trzecią składową tensora naprężenia przyjmowano jako  $\sigma_r = 1/2p_0$ . Dane te pozwalają obliczyć równoważne odkształcenie i naprężenie według wzorów:

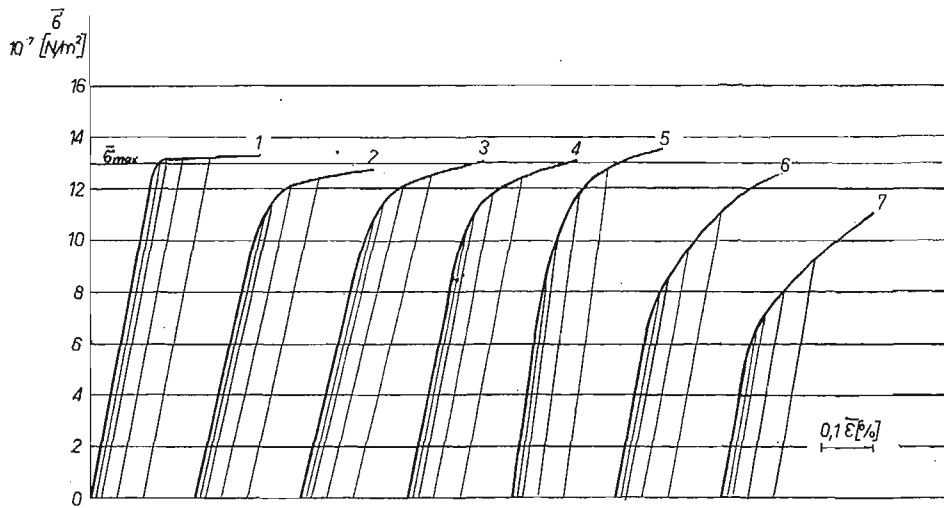
$$(4.1) \quad \bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_0 - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_0)^2},$$

$$(4.2) \quad \Delta \bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(\Delta \epsilon_z)^2 + (\Delta \epsilon_0)^2 + (\Delta \epsilon_z)(\Delta \epsilon_0)},$$

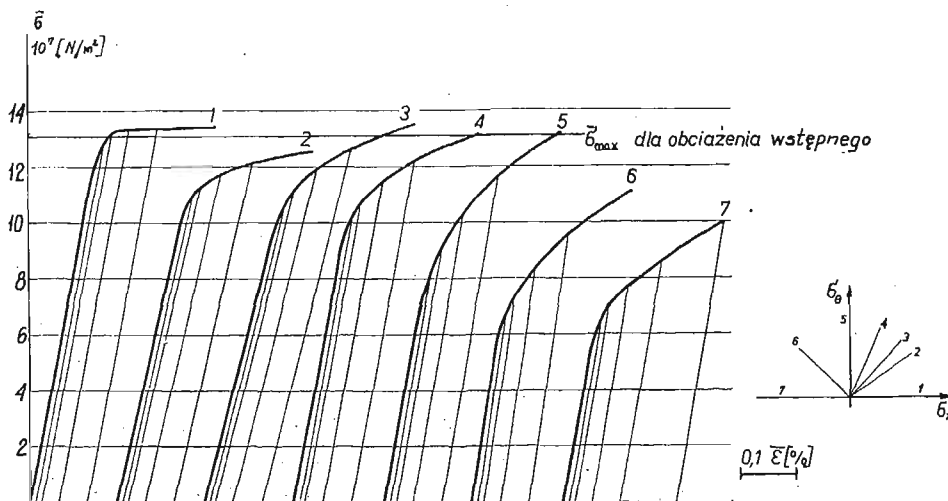
$$(4.3) \quad \bar{\epsilon} = \sum \Delta \bar{\epsilon}.$$

Korzystając z tych przeliczeń wykonywano wykresy  $\bar{\sigma}(\bar{\epsilon})$  (rys. 5, 6, 7), oddzielnie dla trzech programów obciążania wstępnego.

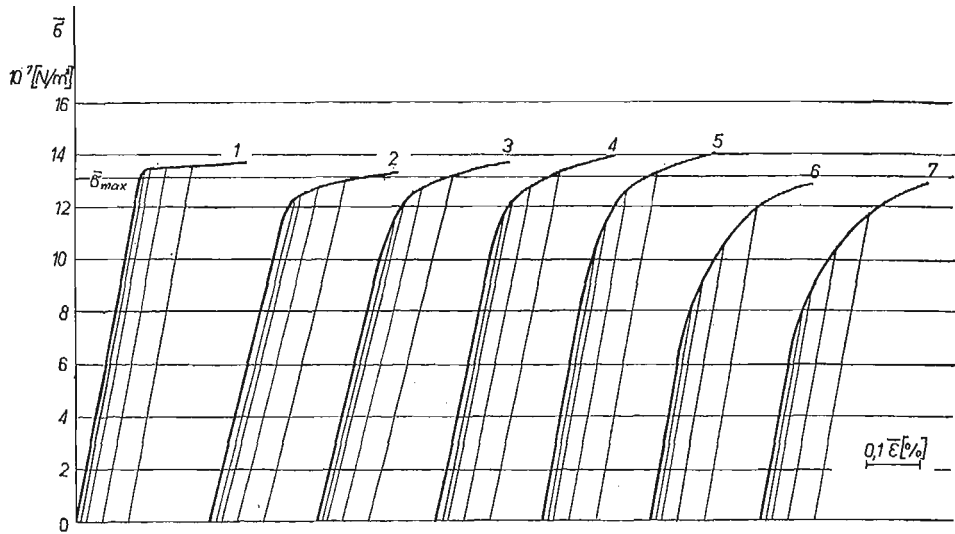
Wykresy  $\bar{\sigma}(\bar{\epsilon})$  dla ściskania oznaczono numerem 7 na rys. 5, 6, 7. Porównując linie nr 7 na rys. 5 oraz 7 z tymi fragmentami programu *A* oraz *C* na rys. 3, które odpowiadają ostatniemu cyklowi ściskania, można zauważyć wpływ starzenia wskutek dwudniowej przerwy między wstępnym i wtórnym obciążeniem. Przerwa ta była potrzebna na wyschnięcie kleju pod tensometrami. Na rys. 3 wykresy  $\bar{\sigma}(\bar{\epsilon})$  przy ściskaniu mają przebieg krzywoliniowy przy małych naprężeniach. Natomiast po dwu dniach przerwy, przy ściskaniu otrzymujemy początkowy zakres sprężysty, a moduł styczny w punkcie  $\epsilon = 0$  jest taki sam, jak przy pierwszym obciążeniu.



Rys. 5. Krzywe umocnienia przy wtórnym obciążeniu. Wstępne cykliczne ściskanie i rozciąganie ze stałą wielkością odkształcenia



Rys. 6. Krzywe umocnienia przy wtórnym obciążeniu. Materiał wstępnie rozciągnięty plastycznie



Rys. 7. Krzywe umocnienia przy wtórnym obciążaniu. Wstępne cykliczne ściskanie i rozciąganie ze stałą wielkością maksymalnych naprężeń

Przy rozciąganiu następującym po cyklicznym umocnieniu, duże odkształcenie plastyczne występuje przy naprężeniach większych od obciążenia wstępnego. Szczególnie jest to widoczne, gdy próbka została wstępnie odkształcona przez cykle rozciągania i ściskania ze stałym naprężeniem.

### 5. Analiza powierzchni plastyczności

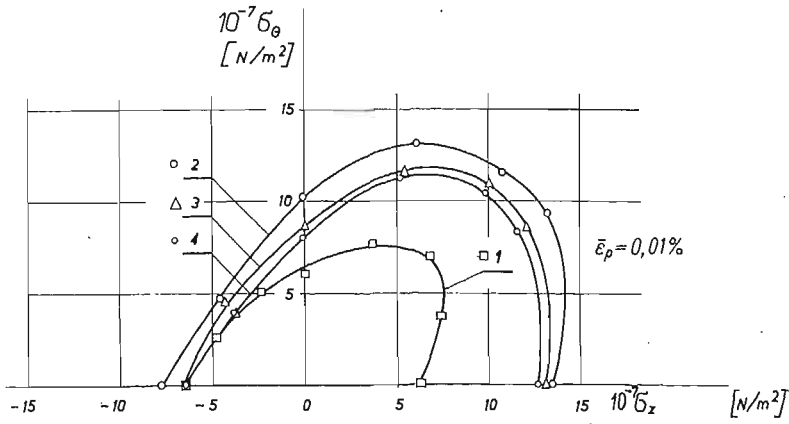
Aby wyznaczyć punkty powierzchni plastyczności postępowano następująco. Znajdowano wartość  $\bar{\sigma}$  odpowiadającą definicji uplastycznienia  $\bar{\epsilon}_p = \text{const}$  prowadząc z odpowiedniego punktu na osi  $\bar{\epsilon}$  prostą równoległą do początkowego liniowego zakresu krzywej  $\bar{\sigma}(\bar{\epsilon})$ , aż do przecięcia z nią.

Dla danej proporcji naprężeń  $\sigma_x = m\sigma_\theta$  ze wzoru (4.1) określano naprężenie  $\sigma_\theta$ , a następnie  $\sigma_x$ . Punkty powierzchni plastyczności naniesiono we współrzędnych  $\sigma_\theta$   $\sigma_x$  oddzielnie dla pięciu wartości  $\bar{\epsilon}_p = 0,01; 0,02; 0,05; 0,2; 0,5\%$  (rys. 8 - 12). Na podstawie punktów doświadczalnych określono przybliżony zarys powierzchni plastyczności.

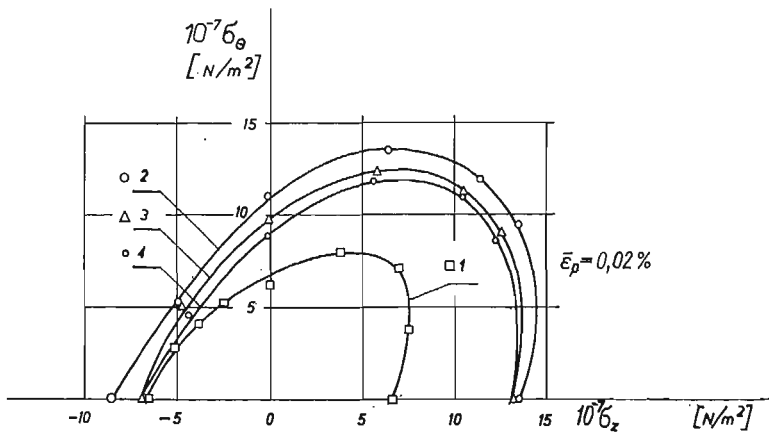
Na jednym wykresie przedstawiono powierzchnię plastyczności materiału wyżarzonego oraz powierzchnię plastyczności materiału umocnionego w trakcie trzech różnych programów obciążeń wstępnych.

Najmniejsze umocnienie materiału otrzymano przez wstępne rozciąganie materiału. Największa powierzchnia plastyczności odpowiada cyklicznemu deformowaniu próbki przy wahadłowym cyklu obciążania. Cykliczne plastyczne deformowanie próbki przy stałym odkształceniu spowodowało umocnienie materiału nieco większe od umocnienia przez rozciąganie.

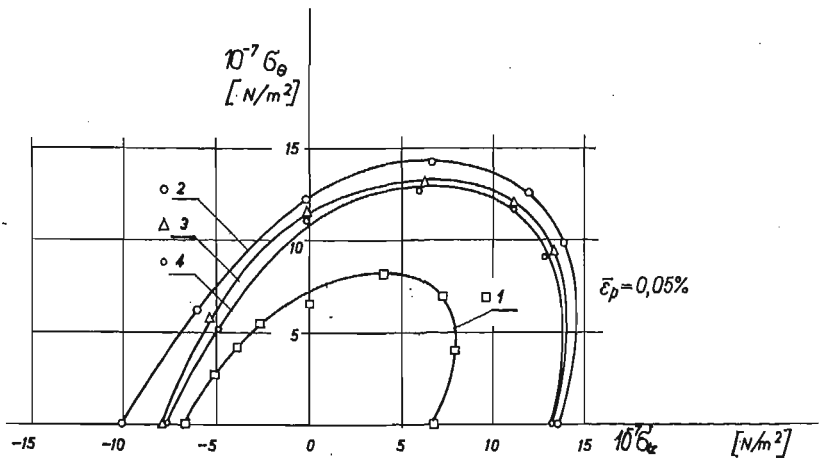




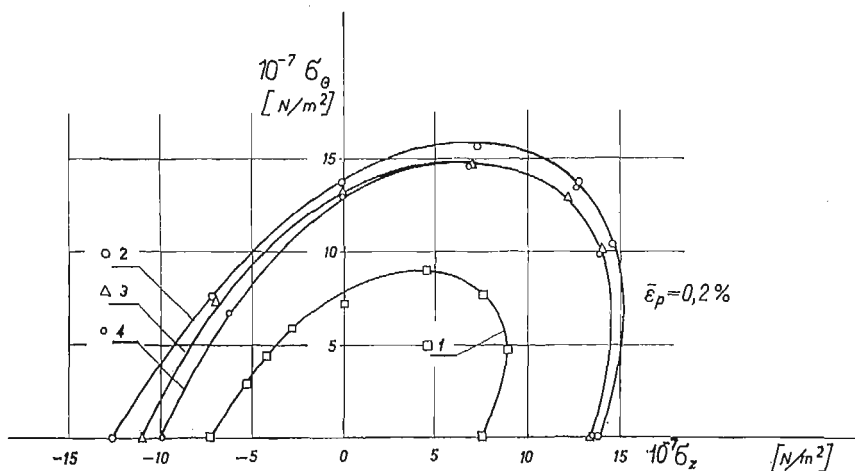
Rys. 8



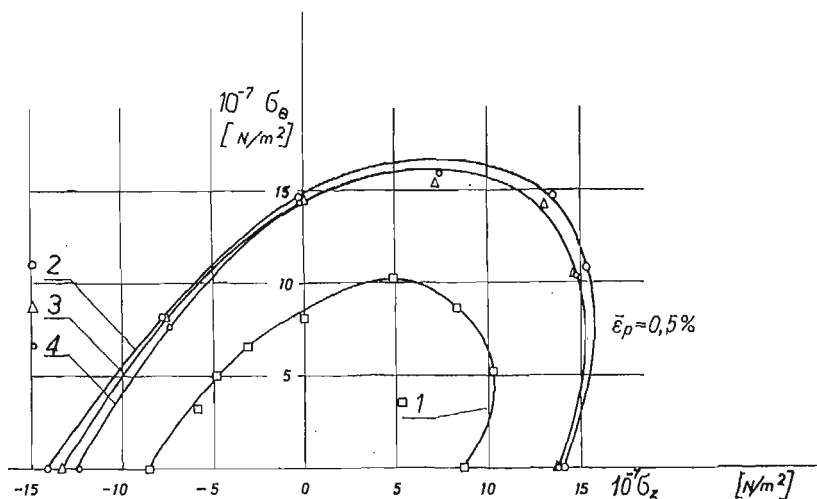
Rys. 9



Rys. 10



Rys. 11



Rys. 12

Rys. 8 do 12. Porównanie powierzchni plastyczności materiału poddanego procesom wstępnej deformacji o programach: 1 — materiał w stanie wyżarzonym; 2 — cykliczne obciążanie ze stałą amplitudą naprężeń; 3 — cykliczne obciążanie ze stałą amplitudą odkształceń; 4 — rozciąganie;  $\epsilon_p$  = trwale odkształcenie przyjęte do wyznaczenia naprężeń uplastyczniających

Najmniejszą powierzchnię plastyczności uzyskano dla największego osiowego odkształcenia wstępnego, które miało miejsce w przypadku jednokrotnego rozciągnięcia próbki. Odkształcenie to było 4,5 razy większe, niż przy cyklicznym deformowaniu ze stałą szerokością pętli histerezy, natomiast powierzchnie plastyczności dla obu programów wstępnej deformacji różnią się niewiele. Największa powierzchnia plastyczności odpowiada pośredniej wielkości odkształcenia, które uzyskano po obciążaniu wstępnym przy symetrycznym cyklu naprężeń. Wielkości wstępnego odkształcenia plastycznego nie są więc parametrem informującym o umocnieniu materiału.

Powierzchnie plastyczności materiału odkształconego są przesunięte w kierunku obciążenia wstępnego i żadna z nich nie przecina powierzchni plastyczności materiału wyższego. W skrajnym przypadku (rys. 8) otrzymano styczne powierzchnie plastyczności. Szczególnie na tym wykresie widać duży wpływ cyklicznego rozciągania i ściskania próbki, ponieważ materiał doznał umocnienia we wszystkich kierunkach obciążenia wtórnego.

## 6. Wnioski

Program obciążania materiału ma bardzo duży wpływ na jego własności plastyczne nawet wtedy, gdy końcowa wielkość naprężeń pozostaje niezmienną.

Trzy programy wstępnego obciążania: rozciąganie, cykliczne rozciąganie i ściskanie ze stałą wielkością odkształcenia oraz ze stałą wielkością naprężenia pokazały, że wielkość odkształcenia plastycznego nie jest parametrem informującym o umocnieniu materiału.

Przyjmując stałą wielkość końcowego naprężenia przy deformowaniu materiału, można dobrać optymalny program zapewniający uzyskanie największego umocnienia materiału. W danym przypadku był to program polegający na cyklicznym ściskaniu i rozciąganiu ze stałą amplitudą naprężeń.

## Literatura cytowana w tekście

1. А. П. Гусенков, сб. *Сопротивление деформированию и разрушению при малом числе циклов нагружения*, изд. Наука, Москва 1967, 34÷63.
2. S. S. MANSON, *Fatigue a complex subject — some simple approximations*, Exp. Mech., 5 (1965) 193.
3. А. И. Чистяков, *Влияние циклического деформирования на эффект Баушингера и границу текучести ст. 20Х*, Исслед. по Упруг. Пласт., сб. 6 (1967) 145—149.
4. R. MARJANOVIĆ, W. SZCZEPIŃSKI, *Yield surfaces of the M-63 brass, prestrained by cyclic biaxial loading*, Arch. Mech. Stos., 26 (1974) 311-320.
5. K. TURSKI, *Badanie wpływu odkształcenia plastycznego na zachowanie się metali przy różnych drogach wtórnego obciążenia*, Mech. Teoret. Stos., 9, (1971) 155÷199.

## Резюме

### ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТЕКУЧЕСТИ

Предварительно деформированные тонкостенные трубчатые образцы испытывались в сложном напряженном состоянии. Исследованы три программы предварительного нагружения: растяжение и циклическое упруго-пластическое деформирование при жестком и мягком нагружении в условиях растяжения-сжатия. Величина последнего максимального растягивающего напряжения была одинаковой для всех программ нагружения. Программа предварительного циклического деформирования при мягком нагружении вызвала наибольшее упрочнение материала. Наименьшая поверхность текучести была получена при предварительном растяжении, которое соответствует наибольшему удлинению образца.

## S u m m a r y

## INFLUENCE OF CYCLIC PLASTIC STRAINING ON THE YIELD SURFACE

Initially deformed tubular brass specimens were tested under complex state of stress. Three programmes of initial prestraining were performed: tension, cyclic tension and compression under constant strain and constant stress. Maximum stresses in tension in each programme were equal. Third programme leads to the greatest strain-hardening of the material. The smallest surface of plasticity corresponds to the initial tension in spite of the fact that it leads to the greatest initial elongation of the specimen.

INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI POLSKIEJ AKADEMII NAUK, WARSZAWA

*Praca została złożona w Redakcji dnia 4 lutego 1974 r.*

---