

ANALIZA OBROTU POWIERZCHNI PŁYNIĘCIA Z UWZGLĘDNIENIEM PAMIĘCI MATERIAŁU

HENRYK SKROCKI

*Uniwersytet Warszawski
Filia w Białymstoku*

1. Wstęp

Materiały plastyczne, wykazujące wzmocnienie, w wyniku odkształcenia plastycznego zmieniają swoje własności mechaniczne. Wiąże się z tym również zmiana kształtu powierzchni plastyczności. Charakter tych zmian jest zależny od kierunku obciążeń wstępnych. Istnieje szereg teorii opisujących zachowanie się powierzchni plastyczności pod wpływem obciążeń wstępnych. Do najczęściej stosowanych, a jednocześnie najprostszych, należą dwie z nich. Pierwsza to, wysunięta przez Prandtla [17], hipoteza izotropowego wzmocnienia. Zakłada ona równomierne rozszerzanie się powierzchni plastyczności we wszystkich kierunkach. Potwierdzenie tej teorii uzyskano w pracy [12]. Hipoteza druga, uwzględniająca efekt Bauschingera, zaproponowana przez E. MELANA [14], A. ISZLIŃSKIEGO [18] i W. PRAGERA [15], a następnie rozwinięta i zmodyfikowana w pracach R. T. SHIELDA i H. ZIEGLERA [16, 13], zakłada przesuwanie się powierzchni plastyczności w przestrzeni naprężeń bez obrotu. Wymiary i kształt powierzchni pozostają bez zmian.

Obie te teorie, jak wykazano w pracy [9], mogą być efektywne przy opisie pamięci materiału.

Kompleksowe badania efektu pamięci rozpoczął J. Miastkowski. Polegają one na porównywaniu własności materiału odkształconego plastycznie wzdłuż drogi składającej się z dwóch etapów z własnościami materiału obciążanego tylko drugim etapem. Jeżeli drugi etap obciążenia jest stosunkowo mały, w porównaniu z etapem pierwszym, wtedy zauważa się wyraźny wpływ tego pierwszego na własności materiału. Przy wydłużaniu drugiego etapu wpływ ten maleje, czyli materiał „zapomina” o skutkach w nim wywołanych odkształceniami na drodze pierwszego etapu obciążenia.

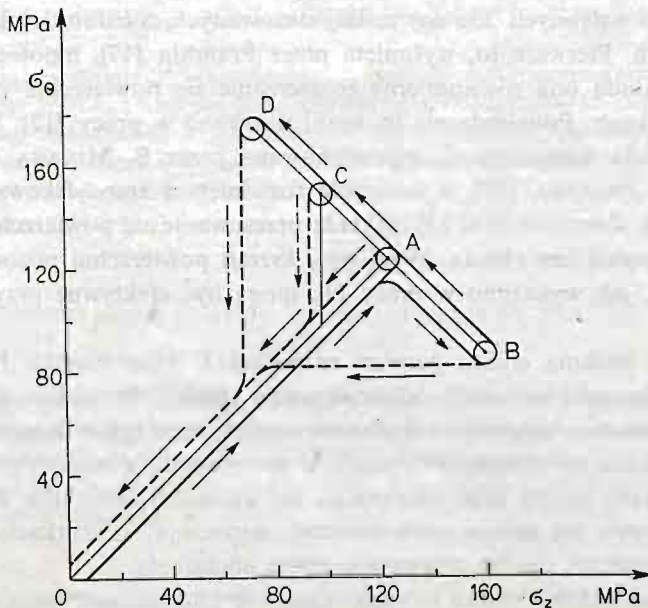
Dotychczasowe badania efektu pamięci materiału prowadzono zarówno na próbkach rurkowych [4], jak i płaskich [5]. Na efekt „pamięci” materiału zwrócono również uwagę w pracach [1, 2, 3].

W prezentowanej pracy przeprowadzono teoretyczną i doświadczalną analizę pamięci materiału obciążanego wstępnie wzdłuż dróg, które wywoływały obrót powierzchni plastyczności. Obrót powierzchni plastyczności uzyskano już wcześniej w pracy [7]. Podobny efekt można również zauważyć w pracach [8, 10].

2. Program badań

Przed przystąpieniem do badań efektu pamięci materiału wszystkie próbki podzielono na dwie grupy. Próbki odkształcano plastycznie wzdłuż złożonych, innych dla każdej z tych grup, dróg obciążenia. Różnica w realizacji dróg obciążenia polegała na wprowadzeniu dodatkowego, pierwszego etapu na początku drogi w grupie pierwszej. Etap ten wywierał określony wpływ na własności materiału. Dalszy ciąg drogi obciążenia, określony jako etap drugi, był taki sam jak w grupie drugiej. Przy realizacji takiego programu obciążeń z jednego, izotropowego w stanie wyjściowym, materiału otrzymywano „dwa nowe materiały” różne pod względem własności wytrzymałościowych. Wydłużając drugi etap obciążenia starano się uzyskać odpowiedź na pytanie — czy przy takim działaniu występuje zacieranie się różnic we własnościach „obu materiałów”, a tym samym „zapomnienie” wpływu pierwszego etapu na aktualne własności materiału.

Program badań, przeprowadzonych w tej pracy, składa się z ośmiu serii po siedem próbek w każdej. Próbki serii I wykorzystano do określenia powierzchni plastyczności materiału w stanie wyjściowym po wyżarzeniu. Dla każdej z pozostałych siedmiu serii, przed określeniem powierzchni płynięcia, próbki były odkształcane plastycznie złożonymi obciążeniami. Schematy dróg wstępnego obciążenia przedstawiono na rys. 1. Linia ciągłą



Rys. 1

zaznaczono drogi obciążeń wstępnych, natomiast linią przerywaną drogi odciążenia. Dla wszystkich serii obciążenie w pierwszej fazie przebiegało wzdłuż odcinka OA drogi leżącej na dłuższej osi teoretycznej elipsy Hubera-Misesa. Odcinek ten nie miał wpływu na obrót powierzchni plastyczności. Przebieg dalszego ciągu drogi odciążenia był uzależniony od tego, do której z dwóch grup należała dana seria próbek.

W grupie pierwszej, określonej jako materiał „pierwszy”, dalsze obciążenie składało się z dwóch etapów. Pierwszy etap wywoływał obrót powierzchni plastyczności w kierunku osi σ_z i przebiegał odcinek AB. Etap drugi rozpoczynał się w punkcie B, a kończył się, odpowiednio dla poszczególnych serii, w punktach: A (seria III), C (seria V) i D (seria VII).

W drugiej grupie próbek, określonej jako materiał „drugi”, schemat dróg obciążenia nie zawierał odcinka AB (pierwszego etapu), a obciążenie przebiegało wzdłuż części drogi drugiego etapu (począwszy od punktu A) wywołując obrót powierzchni w kierunku osi σ_θ . Obciążenie to kończyło się w tych samych, co w grupie pierwszej, punktach: A (seria IV), C (seria VI) i D (seria VIII). Z punktów tych (A, C, D) następowało odciążenie po linii łamanej do punktu 0 — jednakowo dla obu grup próbek.

3. Analiza teoretyczna

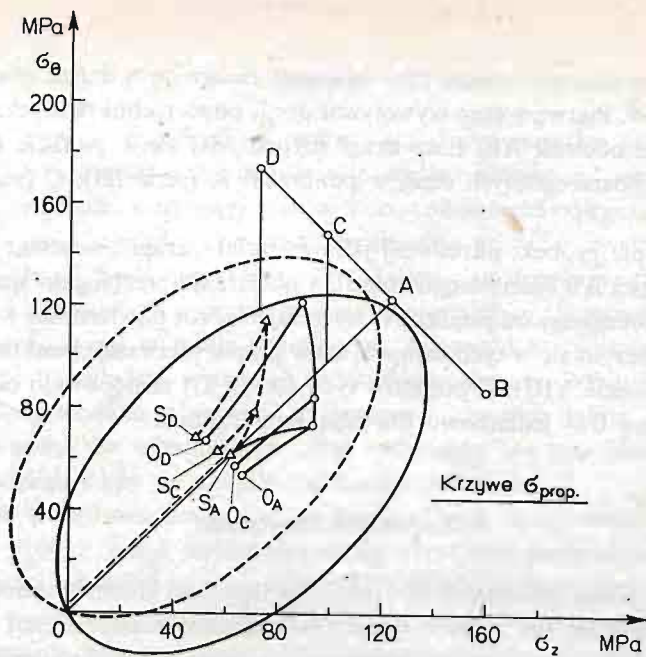
Analizę teoretyczną wykonano w oparciu o hipotezę kinematycznego wzmocnienia. Hipoteza ta wprawdzie nie opisuje obrotu powierzchni plastyczności, niemniej jednak daje korzystne rezultaty przy zastosowaniu jej do opisu pamięci materiału.

Obrót powierzchni plastyczności można opisać w oparciu o regułę anizotropowego wzmocnienia podaną przez A. BAŁTOWA i A. SAWCZUKA [11]. W tej teorii do opisu powierzchni plastyczności wykorzystuje się parametry aktualnego stanu naprężenia, natomiast nie uwzględnia się historii obciążenia. Dlatego też w takiej postaci reguła ta nie może być wykorzystana do opisu pamięci materiału.

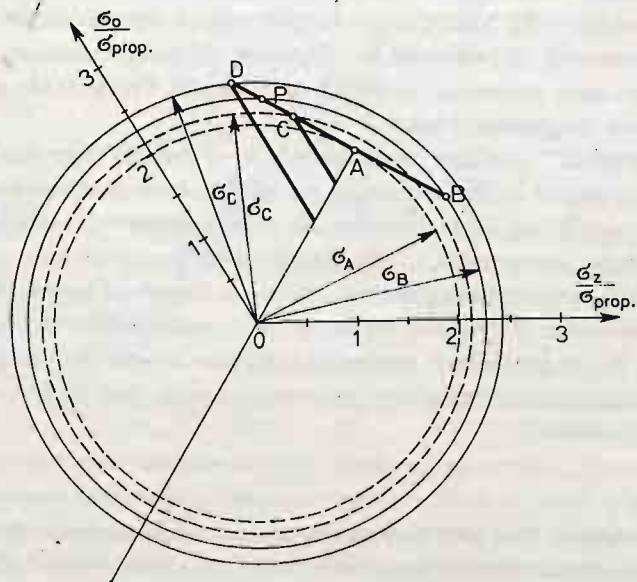
Pewne modyfikacje do omówionej reguły, uwzględniające historię obciążenia, wprowadził W. Ł. DANIŁOW [19]. Modyfikacje te polegają na wprowadzeniu pewnych współczynników wyznaczanych doświadczalnie. Wymaga to przeprowadzenia serii prób rozciągania i ściskania oraz skręcania w dwóch kierunkach. Próby takie nie były uwzględnione w założonym programie badań.

Efekt „zapominania” skutków wywołanych w materiale pierwszym etapem drogi obciążenia można również opisać opierając się na hipotezie izotropowego wzmocnienia. Jednak uzyskane wyniki są zbyt rozbieżne ze wskazaniami doświadczeń. Analizę tego zagadnienia pokazano na rysunku 3. Dla uproszczenia przedstawiono ją na płaszczyźnie oktaedrycznej, gdzie powierzchnie plastyczności mają kształt okręgów. W tym przypadku są to okręgi współosiowe. Z rysunku widać, że przy wydłużaniu odcinka drogi drugiego etapu obciążenia, już w punkcie P następuje pokrycie się porównywanych powierzchni, czyli całkowite „zapomnienie” skutków pierwszego etapu. Jest to sprzeczne z wynikami uzyskanymi doświadczalnie.

Analizę teoretyczną, opartą na hipotezie kinematycznego wzmocnienia, przedstawiono na rysunku 2. Linia ciągłą nakreślono tory środków powierzchni plastyczności materiału „pierwszego”, natomiast linią przerywaną dla materiału „drugiego”. Końcowe położenia tych środków oznaczono odpowiednio: dla materiału „pierwszego” O... z dolnym indeksem oznaczającym punkt, na drodze drugiego etapu, do którego prowadzono obciążenie oraz dla materiału „drugiego” S... z takim samym indeksem. Na rysunku tym narysowano przykładowo dwie powierzchnie plastyczności o środkach w punktach O_A i S_D



Rys. 2



Rys. 3

Jeżeli w wyniku wydłużania drogi drugiego etapu obciążenia materiał „zapomina” o etapie pierwszym, to porównywane powierzchnie powinny zbliżać się do siebie. Rys. 2 pokazuje, że w istocie tak jest. Dla drugiego etapu, równego odcinkowi BA, odległości środków powierzchni O_A i S_A są znaczne, przy wydłużeniu drugiego etapu do punktu C odległości środków O_C i S_C są nieco mniejsze, a przy wydłużeniu tego etapu do punktu D odległości O_D i S_D są już niewielkie.

4. Metodyka badań doświadczalnych

4.1. Materiał i próbki. Badania prowadzono na próbkach rurkowych ze stopu aluminium PA6Nta (AlCu4Mg1). Probki wycinano z cienkościennych rur ciągnionych. Przed dalszą obróbką przeprowadzono selekcję wymiarową próbek. Założono dopuszczalne tolerancje: dla średnicy 0,3% jej wartości średniej oraz dla grubości ścianki 3%, także jej wartości średniej. Wybrane próbki poddano wyżarzaniu w temperaturze $390^\circ \pm 10^\circ\text{C}$ w czasie 5 godzin. Wyżarzanie miało na celu usunięcie anizotropii, wywołanej odkształceniem plastycznym przy wykonywaniu rur ciągnionych, oraz polepszenie własności plastycznych materiału. W wyżarzonych próbkach formowano kołnierze przy pomocy specjalnego przyrządu, opisanego w pracy [9], zapewniającego nienaruszalność środkowej, pomiarowej strefy próbki. Po oczyszczeniu mechanicznym zewnętrznej powierzchni w strefie pomiarowej, dokładnie mierzono średnicę i grubość ścianki. Pomiary wykonywano dwukrotnie, przed i po obciążeniu wstępnym. Ostatnim zabiegiem w procesie przygotowania próbek było naklejanie tensometrów. Naklejano je na zewnętrznej stronie próbek, po dwa (symetrycznie na przeciwnych ich stronach) w obu kierunkach obciążenia.

4.2. Aparatura pomiarowa i sposób obciążania. Do zadawania obciążeń wstępnych wykorzystano przyrząd zbudowany w ZMOC IPPT PAN w Warszawie. Konstrukcja przyrządu umożliwia niezależne obciążanie próbek w kierunku wzdłużnym (osiowe rozciąganie) oraz obwodowym (ciśnienie wewnętrzne). Dzięki temu istnieje możliwość obciążania wzdłuż dowolnych proporcjonalnych dróg obciążenia w całej pierwszej ćwiartce płaszczyzny naprężeń $\sigma_z - \sigma_\theta$. Schemat i zasadę działania przyrządu można znaleźć w pracy [9].

Ze względu na skokową zmianę ciśnienia w układach obciążających, rzeczywiste drogi obciążenia nieco odbiegały od teoretycznych prostych proporcjonalnego obciążenia. Największe odchylenia od teoretycznych dróg nie przekraczały wartości 3 MPa.

Odształcenia mierzono za pomocą elektrycznych tensometrów oporowych, krato- wych typu RL-15/120/Z. Do pomiarów wykorzystano zestaw tensometryczny typu M1000 produkcji czechosłowackiej. Przy zastosowaniu wyżej omawianych tensometrów zestaw ten zapewniał dokładność odczytu rzędu $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-6}$.

5. Wyniki badań doświadczalnych

5.1. Metodyka określania powierzchni plastyczności. Do określania każdej powierzchni plastyczności używano po 7 próbek. Probki te obciążano wzdłuż proporcjonalnych dróg obciążenia wychodzących z początku układu współrzędnych. Dla każdej drogi obciążenia

znajdowano granicę plastyczności i jako punkt przenoszono ją na prostą przedstawiającą daną drogę. Łącząc punkty uzyskane dla różnych dróg otrzymano krzywą przedstawiającą przekrój powierzchni plastyczności płaszczyzną $\sigma_z - \sigma_\theta$. Krzywą tą zwykle określa się krótko — powierzchnia plastyczności. W tej pracy znajdowano szereg granic plastyczności, zdefiniowanych różną wartością trwałych odkształceń, wynoszącą odpowiednio $\varepsilon^p = 0,005\%$; $0,01\%$; $0,02\%$; $0,1\%$; $0,2\%$; $0,3\%$; $0,4\%$; $0,5\%$. Oprócz tego znajdowano granicę proporcjonalności. W związku z tym określono szereg powierzchni plastyczności, oznaczonych tak jak umowne granice plastyczności. Przyjęty sposób określania granic plastyczności był stosowany w pracach [1, 2, 7]. Do obliczania intensywności odkształceń plastycznych ε_t oraz intensywności naprężeń stycznych przyjęto zależności:

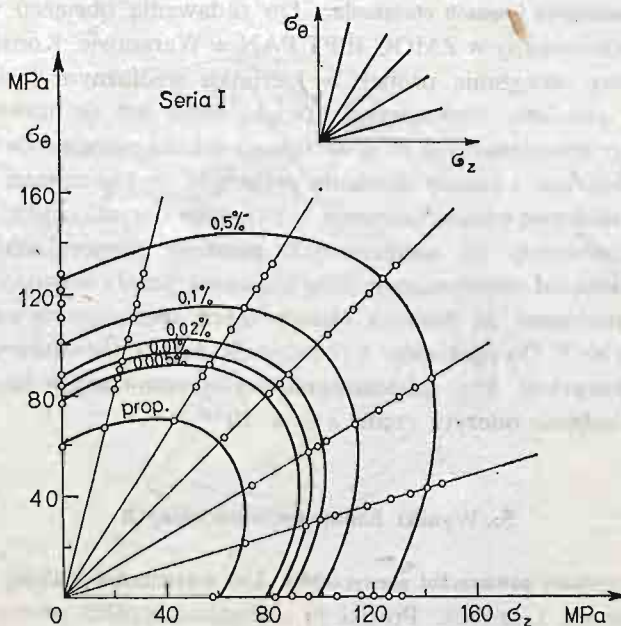
$$\varepsilon_t = \sum_{k=1}^n \Delta \varepsilon_t^k$$

gdzie: $\Delta \varepsilon_t = \sqrt{\Delta \varepsilon_z^2 + \Delta \varepsilon_z \Delta \varepsilon_\theta + \Delta \varepsilon_\theta^2}$

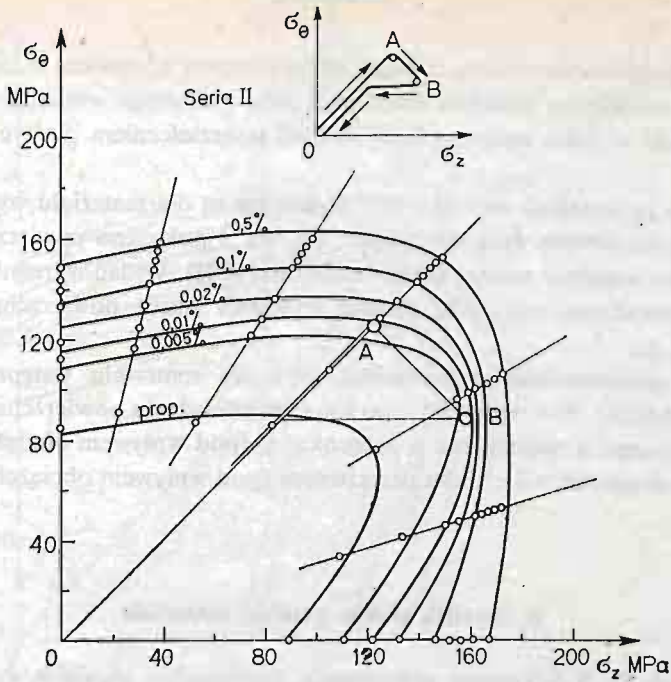
$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2]}$$

gdzie: $\sigma_r = -\frac{1}{2}p$ jest naprężeniem ściskającym, wywołanym działaniem ciśnienia oleju na wewnętrzną ściankę próbki.

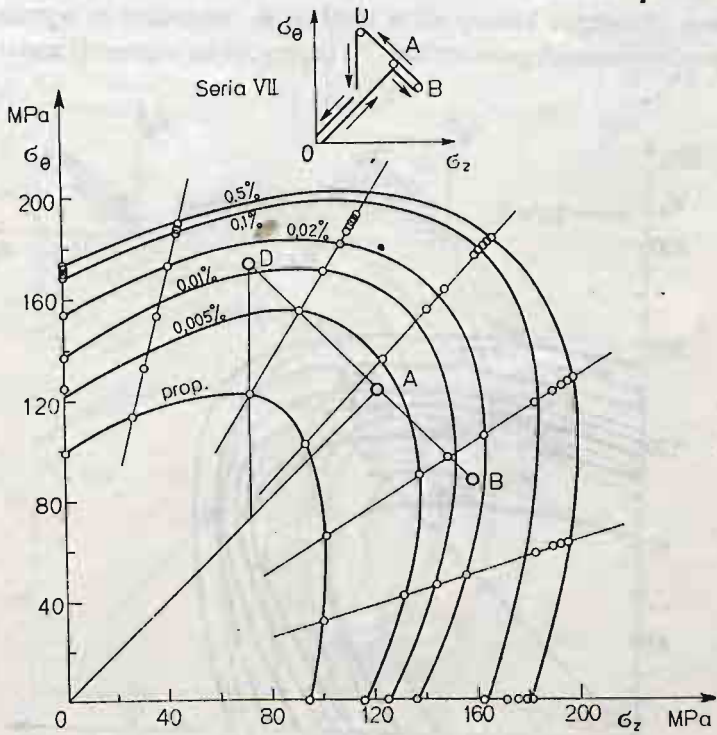
5.2. Analiza wyników pomiarów i obliczeń. Na rys. 4 pokazano powierzchnie plastyczności serii I dla materiału w stanie wyjściowym. Z rysunku widać, że doświadczalne punkty



Rys. 4



Rys. 5



Rys. 6

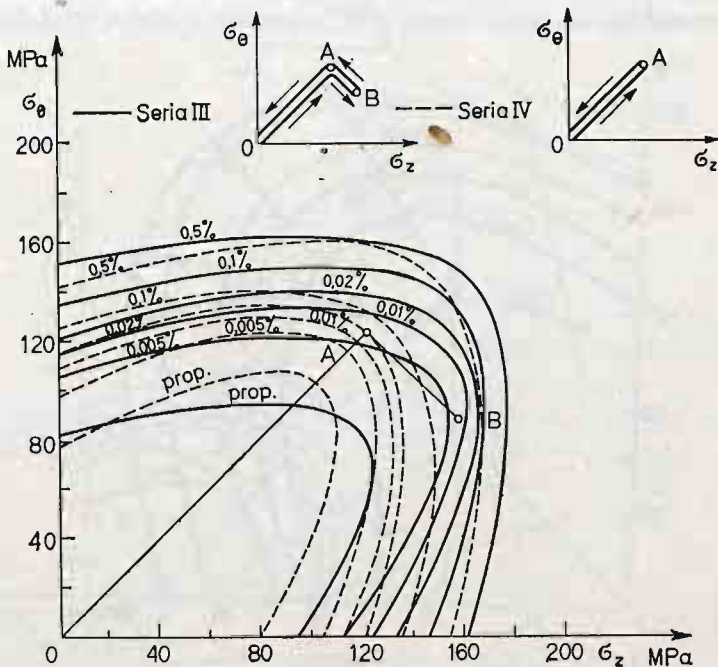
układają się w pobliżu teoretycznych elips, narysowanych w oparciu o hipotezę Hubera-Misesa. Pewne odchylenie punktów dla dwóch dróg obciążenia wskazuje na to, że wyrażanie nie usunęło w pełni anizotropii wywołanej odkształceniem plastycznym przy produkcji rur.

Powierzchnie pozostałych serii II ÷ VIII wykonane są dla materiału wstępnie odkształconego wzdłuż określonych dróg obciążenia. Na rys. 5 pokazano powierzchnie dla materiału obciążanego wstępnie wzdłuż drogi OABO (seria II). Widać wyraźnie, że obciążenie wstępne przeprowadzone po takiej drodze wywołuje obrót powierzchni plastyczności w kierunku osi σ_z .

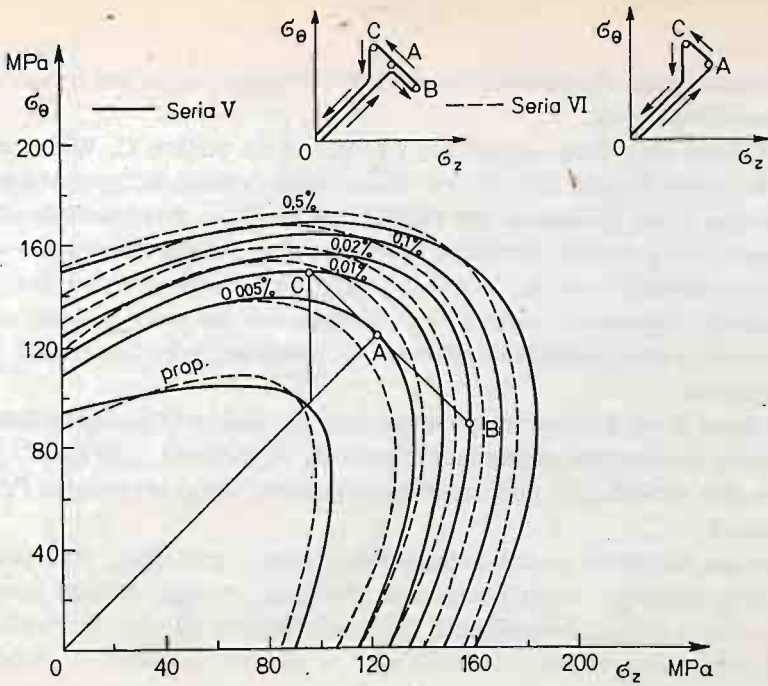
Na rys. 6 przedstawiono powierzchnie płynięcia materiału wstępnie obciążanego wzdłuż drogi OABDO. Pod wpływem tego sposobu obciążenia powierzchnia plastyczności doznaje dwukrotnego skręcenia, raz w kierunku σ_z (pod wpływem obciążenia pierwszego etapu AB) oraz drugi raz w kierunku przeciwnym (pod wpływem obciążeń drugiego etapu drogi BD).

6. Analiza efektu pamięci materiału

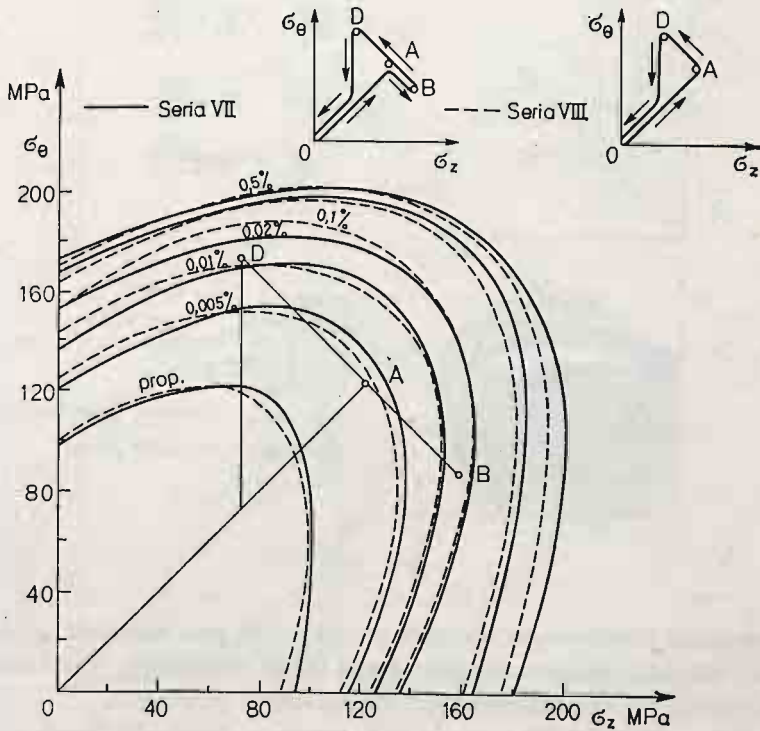
Na rysunkach 7 ÷ 9 dokonano porównania powierzchni płynięcia materiału „pierwszego” i „drugiego” w kolejnych stadiach drogi drugiego etapu obciążenia. Na rys. 7 drugi etap drogi obciążenia kończy się w punkcie A. Widoczne są wyraźne rozbieżności w położeniu porównywanych powierzchni. To znaczy, że na własności materiału ma wyraź-



Rys. 7



Rys. 8



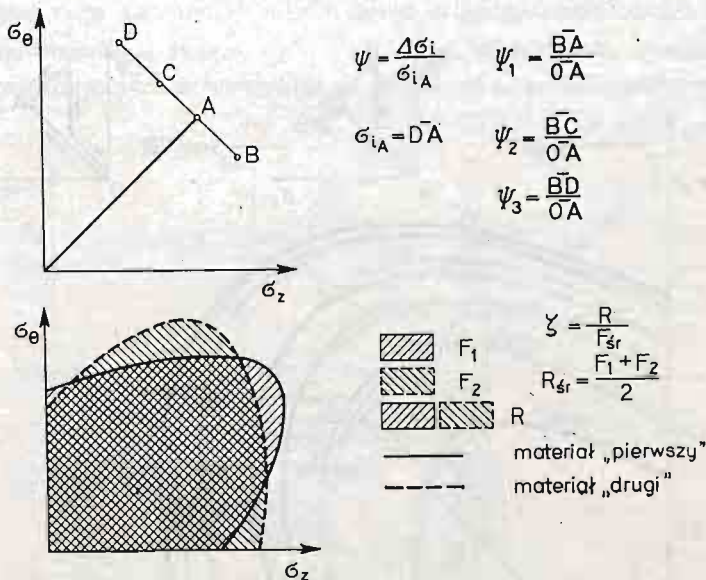
Rys. 9

ny wpływ pierwszy etap obciążenia, a odcinek BA drugiego etapu jest jeszcze zbyt krótki, by wpływ ten zlikwidować.

Na rys. 8 drugi etap drogi obciążenia wydłużono do punktu C. Widać wyraźnie, że wydłużenie to spowodowało zmianę we własnościach materiału „pierwszego”. Wpływ pierwszego etapu drogi obciążenia jest tu znacznie mniejszy. Powierzchnia plastyczności, zajmująca uprzednio położenie obrócone w stronę osi σ_z , uległa skręceniu w stronę przeciwną, to jest w kierunku osi σ_θ . Jednak odcinek drogi drugiego etapu jest jeszcze zbyt mały, by materiał „zapomniał” całkowicie o własnościach nabytych podczas odkształcenia na pierwszym etapie drogi obciążenia. Różnice w położeniu porównywanych powierzchni są jeszcze wyraźne.

Po wydłużeniu drogi drugiego etapu obciążenia do punktu D nastąpiło dalsze zbliżenie porównywanych powierzchni płynięcia. Oznacza to, że materiał „pierwszy” „zapomniał” o skutkach w nim wywołanych podczas pierwszego etapu drogi obciążenia. Przedstawiono to na rysunku 9.

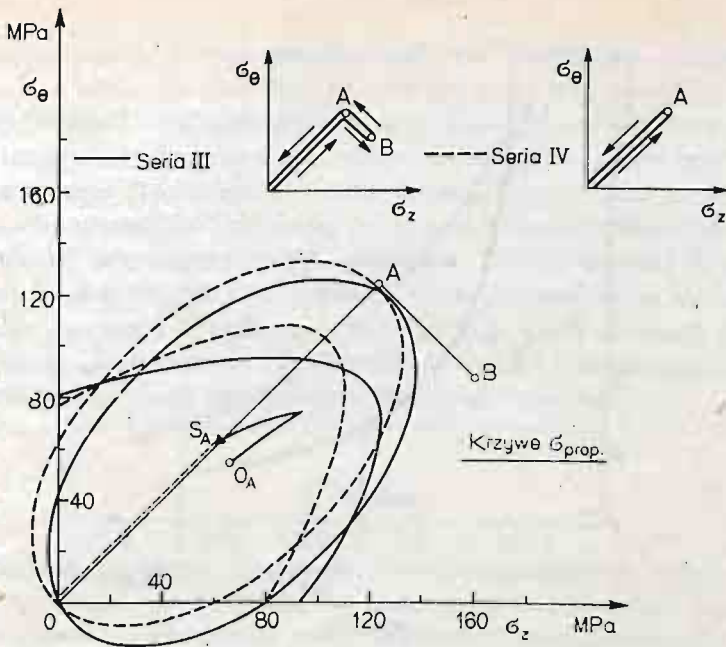
Efekt pamięci materiału można przedstawić w formie graficznej, jako pewną funkcję parametru drogi drugiego etapu obciążenia. Definicję przyjętej funkcji pamięci ζ oraz definicję parametru drogi „zapominania” ψ przedstawiono na rys. 10. Funkcja ζ jest to stosunek niepokrywających się pól uzyskanych w wyniku nałożenia na siebie porówny-



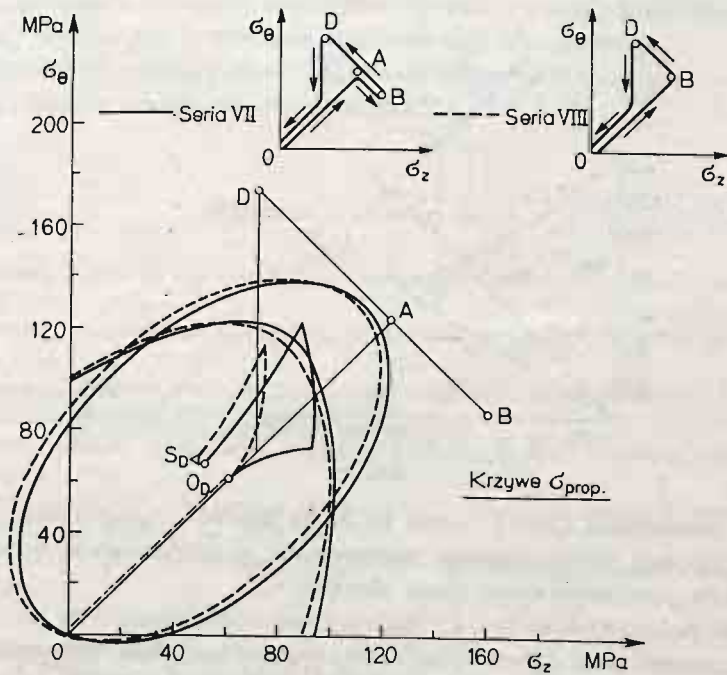
Rys. 10

wanych powierzchni płynięcia do wartości średniej tych pól. Parametr ψ jest określony jako stosunek długości odcinka drugiego etapu drogi obciążenia, wyrażanego w intensywnościach naprężenia, do intensywności naprężenia w punkcie A.

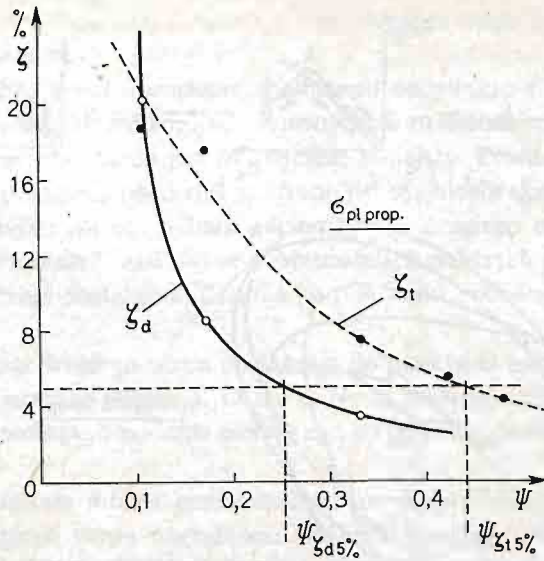
Omówioną funkcję $\zeta_d(\psi)$ dla otrzymanych wyników doświadczalnych przedstawiono na rys. 13. Dla porównania wykreślono również, zdefiniowaną w ten sam sposób, funkcję teoretyczną $\zeta_t(\psi)$. Z przebiegu otrzymanych krzywych widać, że funkcja $\zeta_d(\psi)$ leży w za-



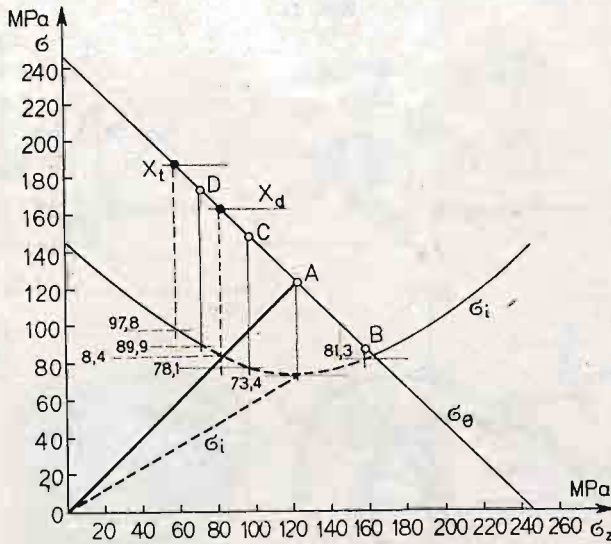
Rys. 11



Rys. 12



Rys. 13



Rys. 14

kresie funkcji teoretycznej $\zeta_t(\psi)$. Oznacza to, że na drodze „zapominania”, oszacowanej w oparciu o hipotezę kinematycznego wzmocnienia, w rzeczywistym materiale nastąpi zatarcie skutków pierwszego etapu drogi obciążenia.

Z przebiegu pokazanych na rys. 13 funkcji $\zeta_d(\psi)$ i $\zeta_t(\psi)$ wynika, że hipoteza kinematycznego wzmocnienia dość dobrze opisuje efekt pamięci materiału. Natomiast jeśli chodzi o kształt i wymiary powierzchni plastyczności, to różnice są istotne. Wskazują na to rys. 11 i 12, na których pokazano przykładowo porównanie wybranych powierzchni plastyczności.

Omówione uprzednio funkcje pamięci materiału umożliwiają oszacowanie drogi „zapominania”, to znaczy długości odcinka drugiego etapu drogi obciążenia, przy którym następuje „zapomnienie” własności uzyskanych na pierwszym etapie. Następuje to wtedy, gdy przy wydłużaniu tego drugiego etapu, własności materiałów „pierwszego” i „drugiego” pokryją się, a funkcja $\zeta(\psi)$ osiągnie wartość zerową. Dopuszczając pewien rozrzut we własnościach „obu materiałów” założono, że już przy wartości funkcji $\zeta(\psi) = 5\%$, nastąpiło „zapomnienie” poprzedniej historii obciążenia. Dla tej wartości funkcji, zarówno doświadczalnej $\zeta_d(\psi) = 5\%$, jak i teoretycznej $\zeta_t(\psi) = 5\%$, znaleziono wartość parametru ψ . Wartości tego parametru wyznaczają punkty X_d i X_t na drodze drugiego etapu, określające długość drogi „zapominania”. Przedstawia to rys. 14. Na rysunku tym pokazano również wykres intensywności naprężenia wzdłuż drogi obciążenia

7. Wnioski

1. Odształcenia plastyczne, materiału quasi-izotropowego w stanie wyjściowym, przy złożonych obciążeniach powodują przesunięcie, zmianę kształtu i wymiarów oraz, przy pewnych sposobach obciążenia, obrót powierzchni plastyczności.

2. Obrót ten jest szczególnie wyraźny dla powierzchni definiowanych granicą proporcjonalności oraz najmniejszymi wartościami trwałych odształceń plastycznych, jak $\varepsilon^p = 0$, $\varepsilon^p = 0,005\%$ i $0,01\%$. Dla większych wartości ε^p obrót ten jest mniej wyraźny.

3. Obciążenie wtórne o zwrocie przeciwnym do pierwotnego powoduje proces odwrotnego skręcenia powierzchni w kierunku tego wtórnego obciążenia.

4. Przy odpowiednio dużej wartości obciążenia wtórnego w materiale następuje zatarcie (zapomnienie) śladów obciążenia pierwotnego.

Literatura cytowana w tekście

1. J. MIASTKOWSKI, *Wpływ historii obciążenia na powierzchnię plastyczności*, Mech. Teoret. Stos., 4, 2, 1966, 5 - 16.
2. J. MIASTKOWSKI, *Wpływ historii obciążenia na powierzchnię plastyczności*, (część druga), Mech. Teoret. Stos., 6, 1, 1968, 3 - 31.
3. W. SZCZEPIŃSKI, J. MIASTKOWSKI, *An Experimental Study of the Effect of Aluminium Alloy*, J. Mech. Phys. Solids, vol. 16, 1968, pp. 153 to 162.
4. J. MIASTKOWSKI, *Analysis of the memory effect of plastically prestrained material*, Arch. Mech. Stos., 3, 20, 1968.
5. J. MIASTKOWSKI, *Doświadczalna analiza efektu pamięci materiału poddanego plastycznemu odształceniu*, Mech. Teoret. Stos., 3, 11, 1973, 297 - 314.
6. W. SZCZEPIŃSKI, *On the Effect of Plastic Deformation on Yield Condition*, Arch. Mech. Stos., 2, 15, 1963, 275 - 296.
7. J. MIASTKOWSKI, W. SZCZEPIŃSKI, *Doświadczalne badanie powierzchni plastyczności wstępnie odształconego mosiądzu*, Mech. Teoret. Stos., 3, 2, 1965, 55 - 66.
8. J. PARKER, M. B. BASSETT, *Plastic Stress-Strain Relationships — Some Experiments to Derive a Subsequent Yield Surface*, J. Appl. Mech., 4, 31, 1964.
9. J. MIASTKOWSKI, *Kryteria plastycznego plynienia i hipotezy wzmocnienia metali w świetle badań doświadczalnych*, Prace IPPT PAN, 41/1973.

10. K. KANEKO, K. IKEGAMI, E. SHIRATORI, *The Yield Condition and Flow Rule of Metal for the Various Pre-Strain Path*, Bulletin of the JSME, vol. 19, No. 132, 1976.
11. A. BALTOW, A. SAWCZUK, *A rule of anisotropic hardening*, Acta Mech., vol. 1/2, 1965, 163 - 175.
12. G. J. TAYLOR and H. QUINNEY, *The plastic distortion of metals*, Phil. Trans. Roy. Soc., A230, 1931, 323 - 326.
13. H. ZIEGLER, *A Modification of Prager's Hardening Rule* Quart. Appl. Math., 17, 1959, 55 - 65.
14. E. MELAN, *Zur Plastizität des ramulichen Kontinuum*, Ing.-Arch., 9, 1938, 116 - 126.
15. W. PRAGER, *The theory of plasticity — a survey of recent achievements*, James Chayton Lecture, Proc. Inst. Mech. Engr., 169, 1955, 41 - 47.
16. R. T. SHIELD, H. ZIEGLER, *On Prager's hardening rule*, Zeits. Angew. Math. Phys., 1958, 260 - 276.
17. L. PRANDTL, *Ein Gedankenmodell zur kinetischen Theorie der Festen Körper*, ZAMM, 8, 1928, 85 - 106.
18. А. Ю. Ишлинский, *Общая теория пластичности с линейным упрочнением*, Укр. Мат. Журн. 3, 6, 1954.
19. В. Л. Данилов, *К формулировке закона деформационного упрочнения*, Известия А. Н. СССР Механика твердого тела, № 6, 1971.

Резюме

АНАЛИЗ ОБОРОТА ПОВЕРХНОСТИ ТЕКУЧЕСТИ С УЧЕТОМ ПАМЯТИ МАТЕРИАЛА

В работе представлены ход и результаты экспериментальных исследований памяти материала при сложных нагрузках вынуждающих оборот поверхности пластичности. Исследования проведены на трубчатых образцах сделанных из сплава алюминия.

Теоретический анализ полученных результатов исследований проведен опираясь на гипотезу кинематического упрочнения.

Summary

ANALYSIS OF ROTATION OF YIELD SURFACE WITH CONSIDERATION OF THE MEMORY OF THE MATHERIAL

The procedure and results of experimental investigations of the memory of material at combined loadings exerting rotation of yield surface are presented in the paper. The investigations are performed on the tubular specimens made from aluminum alloy.

Theoretical analysis of the obtained results was performed on the basis of the kinematic work-hardening hypothesis.

Praca została złożona w Redakcji dnia 22 marca 1983 roku