

5.17.10. — obciążenia jedno-
i wieloosiowe

L. Dietrich, Z.L. Kowalewski
M. Śliwowski

ZMIANY PARAMETRÓW ANIZOTROPII
STOPU ALUMINIUM
POD WPLYWEM DEFORMACJI CYKLICZNEJ

27/1994

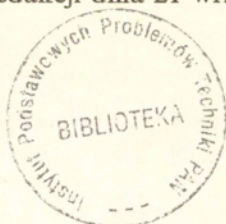
P. 269



WARSZAWA 1994

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 21 września 1994 r.



56622



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 2,5 Ark. druk. 3,0
Oddano do drukarni w październiku 1994 r.

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.
Warszawa, ul. Jasna 1

<http://rcin.org.pl>

Lech Dietrich
Zbigniew L. Kowalewski
Marek Śliwowski

Zakład Wytrzymałości Materiałów

ZMIANY PARAMETRÓW ANIZOTROPII STOPU ALUMINIUM POD WPŁYWEM DEFORMACJI CYKLICZNEJ

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dotyczących wpływu wieloosiowej cyklicznej plastycznej deformacji na zmianę stałych anizotropii stopu aluminium PA6 w płaskim stanie naprężenia. Doświadczenia wykonano na cienkościennych próbkach rurkowych obciążanych jednocześnie kombinacją siły osiowej i rewersyjnego momentu skręcającego. Próbkę wykonano z prętów w stanie dostarczonym z huty i badania początkowej powierzchni plastyczności potwierdziły silną anizotropię stopu, nabytą w procesie wytwórczym. Zasadniczym celem pracy było stwierdzenie w jakim stopniu materiał o wstępnie ukształtowanej teksturze w procesie obróbki plastycznej jest wrażliwy na różnokierunkową cykliczną deformację plastyczną. Badania wykazały, że plastyczne zachowanie stopu bardzo silnie zależy od kierunku wstępnych obciążeń cyklicznych względem głównej osi anizotropii związanej z osią pręta. Stwierdzono, że złożone różnokierunkowe obciążenia cykliczne nie powodują zmiany głównej osi anizotropii związanej z osią próbki. Objawiało się to brakiem obrotu powierzchni plastyczności odpowiadających wszystkim drogom wstępnej deformacji. Kierunek wstępnego obciążenia cyklicznego ma tylko wpływ na zmianę wymiarów osi powierzchni plastyczności pokrywającej się z osią pręta, jednocześnie praktycznie pomijalne są zmiany osi powierzchni plastyczności prostopadłej do głównej osi anizotropii. Największe zmiany wymiarów powierzchni plastyczności zachodzą dla wstępnych obciążeń pokrywających się z kierunkiem początkowej anizotropii badanego stopu. Dla celów porównawczych pokazano, że cykliczna deformacja plastyczna powoduje większą zmianę wymiarów powierzchni plastyczności niż monotoniczna deformacja o takich samych odkształceniach plastycznych.

1. Wstęp

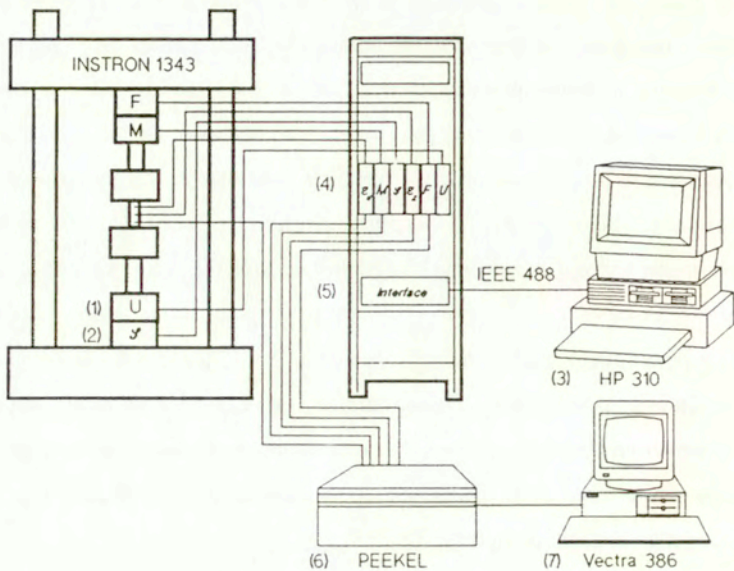
Powierzchnia plastyczności oddzielająca zakres sprężystego i plastycznego zachowania się materiału przy złożonych stanach naprężenia stanowi podstawowy element wytrzymałościowej charakterystyki materiałów konstrukcyjnych. W przestrzeni naprężeń kształt i położenie powierzchni plastyczności dla wyrobów hutniczych są zależne od rodzaju zastosowanej w procesie wytwórczym obróbki plastycznej i obróbki cieplnej. Deformacja plastyczna jakiej poddawane są półwyroby hutnicze jest zwykle bardzo duża i prowadzi do ukształtowania tekstury o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych w zależności od kierunku obciążenia w stosunku do osi tekstury. Deformacja plastyczna jakiej podlega materiał w trakcie obciążeń eksploatacyjnych jest znacznie mniejsza, ale jak wskazują wyniki badań przeprowadzonych w warunkach złożonego stanu naprężenia dla różnych materiałów [1, 2, 3, 4, 5, 6] nawet bardzo mała deformacja plastyczna może prowadzić do znacznych zmian zarówno kształtu jak i położenia powierzchni plastyczności materiału. Znany jest też wpływ obciążeń cyklicznych w zakresie niskocyklowego zmęczenia materiału, które w zależności od rodzaju materiału mogą powodować wzmocnienie lub osłabienie materiału przejawiające się zwiększeniem lub zmniejszeniem granicy plastyczności w stosunku do wartości pierwotnej. Badania takie są prowadzone w wielu laboratoriach ze względu na ich bezpośrednie znaczenie dla zastosowań praktycznych. W większości jednak prac obciążenia cykliczne realizowano w warunkach jednoosiowego rozciągania i ściskania, wyniki takie zebrano w postaci syntetycznej dla różnych materiałów w książce autorstwa Cnr. Bollera i T. Seegera [7]. Znacznie mniej jest natomiast badań dotyczących wpływu obciążeń cyklicznych realizowanych w warunkach złożonego stanu naprężenia na ewolucję powierzchni plastyczności materiału [8, 9, 10, 11]. Wyniki tych prac wskazują na silny wpływ cyklicznych obciążeń wywołujących plastyczną deformację na właściwości mechaniczne materiałów,

jednak brak jest danych doświadczalnych dotyczących wzajemnej korelacji kierunku obciążeń cyklicznych w stosunku do kierunków anizotropii ukształtowanej w trakcie procesu obróbki plastycznej. Spodziewać się bowiem można innego oddziaływania obciążeń cyklicznych w danym kierunku na granicę plastyczności w innych kierunkach. Znaczenie kierunku przy proporcjonalnych obciążeniach cyklicznych wynika w sposób pośredni ze stwierdzonych ostatnio silnych zmian krzywej umocnienia materiału pod wpływem nieproporcjonalnych obciążeń cyklicznych, w których stosunek pomiędzy składowymi naprężeniami zmieriał się w sposób ciągły w danym cyklu obciążenia [12, 13, 14].

Celem pracy jest doświadczalne określenie wpływu kierunku proporcjonalnych obciążeń cyklicznych wywołujących odkształcenia plastyczne na ewolucję powierzchni plastyczności stopu aluminium, który wykazuje w stanie wyjściowym anizotropię plastyczną.

2. Stanowisko badawcze i sposób opracowania wyników badań

Badania doświadczalne przeprowadzono w złożonym, płaskim stanie naprężenia na cienkościennych próbkach rurkowych, w których wartości dwóch niezerowych i niezależnych od siebie składowych naprężenia normalnego w kierunku osiowym próbki σ_{zz} i naprężenia postaciowego $\tau_{\theta\theta}$ realizowano za pośrednictwem siły osiowej i momentu skręcającego na maszynie wytrzymałościowej *Instron* typ 1343, wyposażonej w niezależne siłowniki hydrauliczne sterowane przy pomocy systemu komputerowego umożliwiającego realizację obciążenia z zachowaniem zadanej prędkości poszczególnych składowych naprężenia (bądź odkształcenia) i z zachowaniem zadanej proporcji pomiędzy składowymi naprężenia (bądź odkształcenia). Schemat stanowiska badawczego, wykorzystywanego zarówno do monotonicznego jak i cyklicznego obciążania próbek w warunkach złożonego stanu naprężenia, przedstawiono na rys.1. Stanowisko to opisano szczegółowo w pracy [15].



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego.

Opracowane oprogramowanie komputera *HP310* (3), sterującego pracą siłowników hydraulicznych odpowiednio do obciążeń osiowych (1) i obciążeń skrętnych (2), umożliwiło realizację monotonicznego i cyklicznego obciążania próbki przy różnych stanach naprężenia. Program monotonicznego obciążania próbki służył do wyznaczenia powierzchni plastyczności na podstawie zarejestrowanych krzywych naprężenie-odkształcenie do ustalonej z góry wartości ekwiwalentnych odkształceń plastycznych. Program komputerowy umożliwiał obliczenie, w trakcie obciążania próbki ze stałą prędkością, składowych odkształceń i modułu sprężystości dla określonego wcześniej zakresu ekwiwalentnych naprężeń. Następnie obciążanie prowadzono tak długo, dopóki nie osiągnięto zaplanowanej wartości ekwiwalentnych odkształceń wyznaczonych

w postaci różnicy odkształceń całkowitych i odkształceń sprężystych, które obliczano dla danej wartości naprężeń na podstawie wcześniej określonego modułu sprężystości. W tym momencie przerywano obciążanie próbki, zmieniano parametry sterujące obu silowników hydraulicznych z odkształceń na naprężenia i rozpoczynano odciążanie próbki aż do osiągnięcia zerowej wartości naprężeń osiowych i naprężeń ścinających.

W programie cyklicznego obciążania próbki wielkościami sterującymi silownikami hydraulicznymi były odpowiadające składowe odkształcenia. Próbkę obciążano do zadanych wartości obu składowych odkształceń całkowitych a następnie realizowano zadaną z góry liczbę cykli, w których końcowe wartości składowych odkształceń całkowitych były przeciwnego znaku w stosunku do wartości początkowej danego cyklu. Po osiągnięciu zadanej liczby cykli proporcjonalnego obciążania próbki ze stałymi amplitudami obu składowych odkształceń całkowitych realizowano zadaną liczbę cykli o malejącej w każdym cyklu amplitudzie składowych odkształceń całkowitych o wartość obliczoną z podzielenia amplitudy odkształceń pierwszej części obciążeń cyklicznych przez zadaną liczbę cykli drugiej części obciążeń cyklicznych.

Dzięki zastosowaniu układu podwójnej rejestracji wyników pomiarów, przy pomocy systemu komputerowej akwizycji maszyny *Instron* oraz przy pomocy dodatkowego komputerowego systemu firmy *Peekel* do akwizycji danych pomiarowych, możliwa była rejestracja czterech podstawowych zmiennych: dwóch składowych naprężeń σ_{zz} i $\tau_{z\theta}$ oraz dwóch odpowiadających składowych odkształceń ε_{zz} i $\varepsilon_{z\theta}$ jak również zmiennej uzupełniającej, składowej odkształceń obwodowych $\varepsilon_{\theta\theta}$. Rejestracja wymienionych składowych zachodziła w trakcie pełnego cyklu doświadczalnego obejmującego monotoniczne i cykliczne obciążanie w danym kierunku. W doświadczeniach przy cyklicznym obciążaniu dane pomiarowe przesłane do komputera *HP 310* wykorzystywano tylko do sterowania przebiegiem doświadczenia, natomiast przebieg poszczególnych cykli

rejestrowano przy pomocy dodatkowego układu pomiarowego firmy *Peekel*. Rozwiązanie takie umożliwiło rejestrację wyników poszczególnych cykli przy większej częstotliwości próbkowania i ze znacznie zwiększoną liczbą punktów doświadczalnych w stosunku do ograniczonych możliwości sprzętowych mikroprocesorowego sprzęgu komputerowego firmy *Instron* (5).

Poszczególne składowe odkształceń mierzono, podobnie jak to opisano w pracy [15], przy pomocy tensometrów elektrooporowych. Odpowiednie układy do pomiaru składowych odkształceń zestawiono z dwóch rozet tensometrycznych typu RY83 i dwóch tensometrów typu LY13 firmy *Hottinger Baldwin Messtechnik* naklejonych w środkowej części długości pomiarowej próbki, które razem z odpowiadającymi tensometrami kompensacji zmian temperatury, naklejonymi na dodatkowej tulei cienkościennej z tego samego materiału co próbka i przylegającej do jej części chwytowej, tworzyły układy pełnomostkowe do pomiaru składowych odkształceń osiowych ϵ_{zz} i postaciowych $\epsilon_{\alpha\alpha}$ oraz jeden półmostkowy układ do pomiaru składowych odkształceń obwodowych $\epsilon_{\theta\theta}$. Rozdzielczość pomiaru odkształceń osiowych, postaciowych i obwodowych wynosiła 8×10^{-6} .

Składowe naprężenia określano ze znanych wzorów w odniesieniu do początkowych wymiarów próbki. Naprężenie osiowe obliczano ze wzoru:

$$\sigma_{zz} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot (D_o^2 - d_o^2)}, \quad (1)$$

gdzie F - siła osiowa działająca na próbkę, D_o - początkowa średnica zewnętrzna próbki na jej długości pomiarowej, d_o - początkowa średnica wewnętrzna próbki na jej długości pomiarowej.

Naprężenie styczne odniesione do zewnętrznej średnicy próbki - D_o określono związkiem:

$$\tau_{z\theta} = \frac{16 \cdot M_s \cdot D_o}{\pi \cdot (D_o^4 - d_o^4)}, \quad (2)$$

gdzie M_s - moment skręcający działający na próbkę.

Składowe odkształceń były bezpośrednio mierzone za pomocą układów tensometrycznych. W programie sterującym maszyną wytrzymałościową i w pierwszym przybliżeniu wyznaczania poszukiwanej powierzchni plastyczności badanego materiału efektywne naprężenie określano na podstawie warunku plastyczności Hubera-Misesa dla materiału izotropowego, a efektywne odkształcenie wyznaczano na podstawie odpowiadającego związku wynikającego z drugiego niezmiennika tensora odkształcenia. Wielkości te obliczano na podstawie znanych wzorów:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{zz}^2 + 3 \cdot \tau_{z\theta}^2}, \quad (3)$$

$$\epsilon_e = \sqrt{\epsilon_{zz}^2 + \frac{3}{(1+\nu)^2} \cdot \epsilon_{z\theta}^2}. \quad (4)$$

Przy obliczaniu efektywnych odkształceń przyjmowano, że składowa odkształceń obwodowych jest równa co do wartości bezwzględnej składowej odkształceń po grubości ścianki rurki i wynosi $\nu \cdot \epsilon_{zz}$, gdzie ν oznacza współczynnik Poissona wyznaczany na podstawie pomiaru składowych odkształcenia ϵ_{zz} i $\epsilon_{\theta\theta}$.

Przyjęte uproszczenie przy obliczeniu pierwszego przybliżenia efektywnych naprężeń i odkształceń według zależności (3) i (4) nie ma wpływu na wyniki pomiarów, bowiem w programie sterującym zależności te są jeajnie wykorzystywane do zatrzymania procesu obciążania próbki, gdy efektywne odkształcenia plastyczne osiągną wcześniej określoną wartość. Natomiast w trakcie doświadczenia rejestruje się wartości poszczególnych składowych naprężenia i odkształcenia jako funkcje czasu i wielkości te mogą być dalej

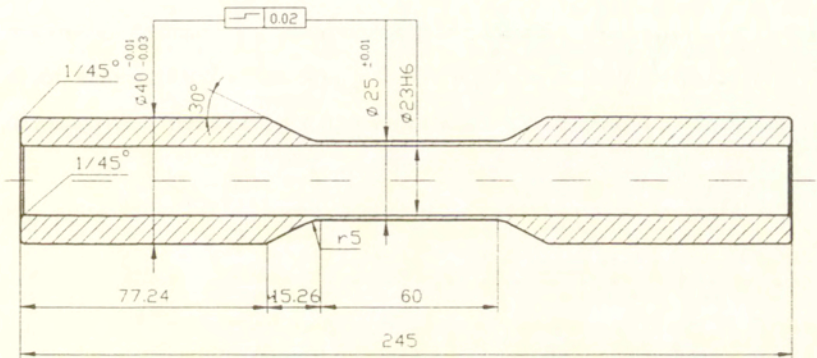
przetwarzane po zakończeniu doświadczenia w sposób, opisany w pracy [16], umożliwiający wyznaczenie współczynników anizotropii metodą iteracji jeśli uzyskane wyniki wskazują, że badany materiał wykazuje cechy anizotropowe. Wyniki prezentowane w pracy ograniczono do pierwszego przybliżenia wartości współczynników anizotropii, co umożliwia oszacowanie typu anizotropii rozpatrywanego materiału i przeprowadzenie porównania z wynikami uzyskanymi wcześniej dla tego samego materiału badanego w stanie dostawy przy monotonicznie rosnących obciążeniach próbki [15].

Na podstawie zależności efektywnych naprężeń jako funkcji efektywnych odkształceń wyznaczano, dla danego kierunku obciążenia, wartości umownych granic plastyczności odpowiadających określonym wartościom efektywnych odkształceń plastycznych stosując taką samą procedurę jak w przytaczanej wcześniej pracy [15]. W podobny sposób eliminowano też zaburzenie przebiegu zależności $\sigma_e - \varepsilon_e$ wynikające z nieliniowości geometrycznych rozwijających się pod wpływem obciążeń osiowych. Przebieg odciążenia próbki w każdym cyklu aproksymowano wielomianem drugiego stopnia i na tej podstawie obliczano moduł sprężystości w każdym cyklu jako pochodną funkcji aproksymującej dla zerowych naprężeń. Następnie obliczano funkcję poprawkową określającą nieliniowe odkształcenia sprężyste jako funkcję naprężeń.

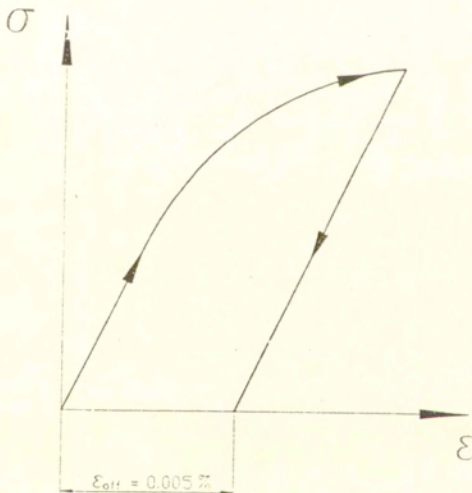
3. Opis programu badań

Badania doświadczalne wykonano na cienkościennych próbkach rurkowych poddanych różnym kombinacjom rozciągającej lub ściskającej siły osiowej i dwukierunkowego momentu skręcającego, w taki sposób aby kierunki obciążania były równomiernie rozłożone w całej przestrzeni rozpatrywanego stanu naprężenia, określonego składową osiową σ_{zz} i składową styczną $\tau_{\theta z}$. Próbkę wytoczono z pełnego pręta o średnicy 45 mm ze stopu aluminium o

symbolu PA6 o następującym składzie chemicznym: {Cu - 3,8± 4,8%, Mg - 0,4± 1,1%, Mn - 0,4± 1%}. Kształt i wymiary próbki przedstawiono na rys. 2.



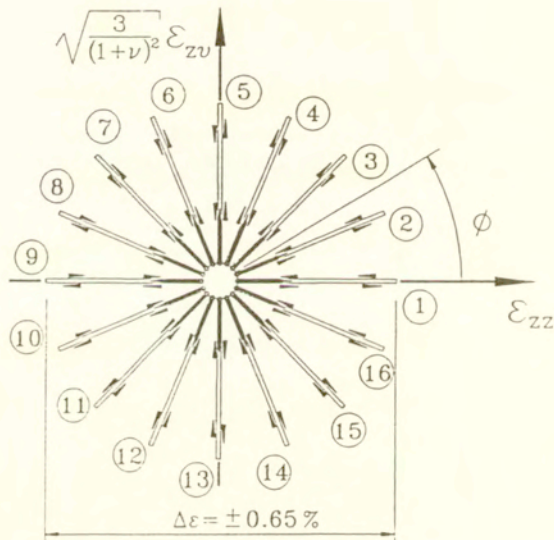
Rys.2 Kształt i wymiary próbki



Rys. 3. Schemat obciążania próbki przy pojedynczym nakłuciu.

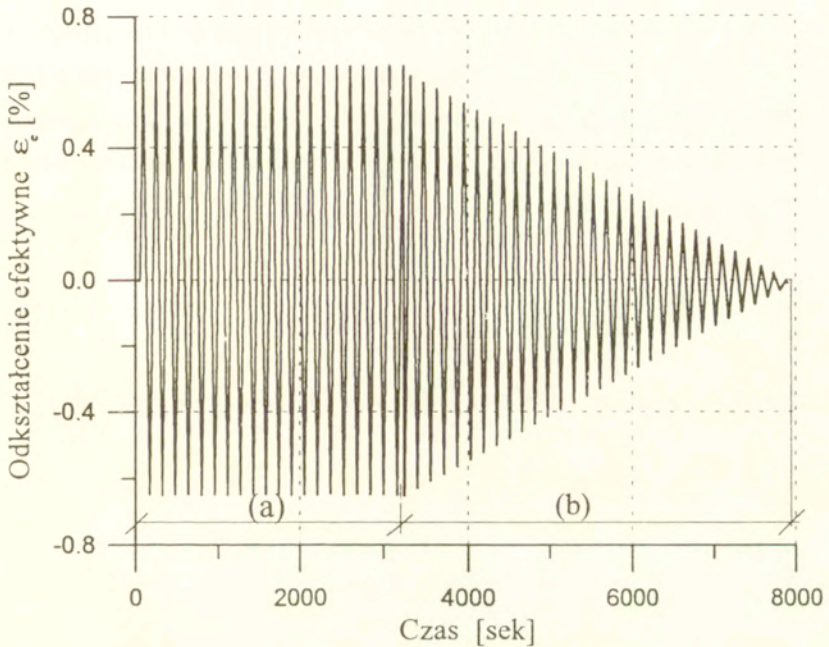
Wykonano szesnaście próbek, z których każda przeznaczona była do obciążania przy innych proporcjach siły osiowej i momentu skręcającego dobranych w ten sposób, aby uzyskać punkty doświadczalne rozłożone równomiernie w rozpatrywanej przestrzeni naprężeń. Program obciążania jednej próbki dla danego kierunku proporcjonalnego obciążania w przestrzeni naprężeń obejmował:

1. Monotoniczne obciążanie próbki ze stałą prędkością odkształcenia równą $5 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ do osiągnięcia ekwiwalentnych odkształceń plastycznych, określonych wzorem (4), równych $0,005\%$, rys. 3,
2. Odciążanie próbki do zerowych wartości siły osiowej i momentu skręcającego, rys.3,



Rys.4a. Schemat pełnego programu testów przy obciążeniach cyklicznych.

3. Cykliczne obciążanie próbek w 16 różnych kierunkach w przestrzeni odkształceń przy kontrolowaniu amplitudy odkształceń całkowitych, przy czym każdemu kierunkowi odpowiadała jedna próbka, rys. 4a.



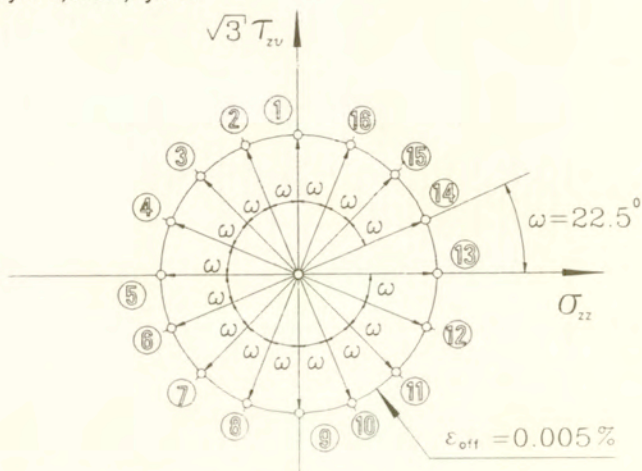
Rys.4b. Schemat pełnego testu obciążeń cyklicznych dla jednej próbki .

Obciążanie każdej próbki przebiegało według programu pokazanego na rys.

4b i obejmowało:

- (a) cykliczne obciążanie ze stałą amplitudą ekwiwalentnych odkształceń całkowitych równą $\Delta\epsilon = \pm 0,65\%$ przy zerowych wartościach średnich odkształceń w cyklu (kierunek pierwszego cyklu obciążenia pokrywał się z nakłuciem realizowanym w punkcie 1 na tej próbce),

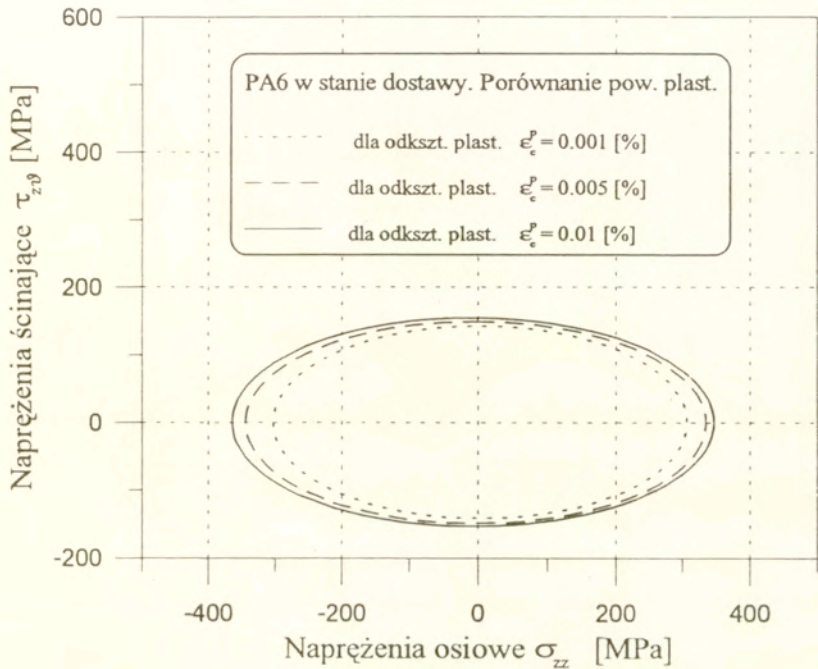
- (b) cykliczne obciążanie z malejącą amplitudą ekwiwalentnych odkształceń całkowitych w każdym półcyklu obciążania, aż do osiągnięcia zerowej wartości amplitudy ekwiwalentnych odkształceń całkowitych,
4. Monotoniczne obciążanie i odciążanie próbki w kolejnych szesnastu kierunkach przestrzeni naprężeń poczynając od kierunku przyjętego w pierwszym punkcie procesu obciążania próbki, realizowane w każdym z tych kierunków ze stałą prędkością odkształcenia równą $5 \cdot 10^{-5} s^{-1}$, do osiągnięcia ekwiwalentnych odkształceń plastycznych określonych wzorem (4) i wynoszących 0,005%, rys. 5.



Rys.5. Program sekwencyjnego wyznaczenia powierzchni plastyczności na jednej próbce.

Wyniki zarejestrowane dla wszystkich 16 próbek obejmujące pierwszy i drugi punkt przedstawionego wyżej programu obciążania wykorzystano do wyznaczenia powierzchni plastyczności materiału w stanie dostawy nie poddanego cyklicznej deformacji. Dane te określają charakterystykę materiału w stanie wyjściowym, która została szczegółowo przedstawiona w pracy [15]. Zbiór uzyskanych tam powierzchni plastyczności z aproksymacji punktów doświadczalnych dla 16

próbek przy różnych definicjach umownej granicy plastyczności pokazano na rys.6. Jedna z tych powierzchni będzie wykorzystywana do porównań w dalszej części pracy i dlatego przedstawiono ją wraz z punktami doświadczalnymi, na

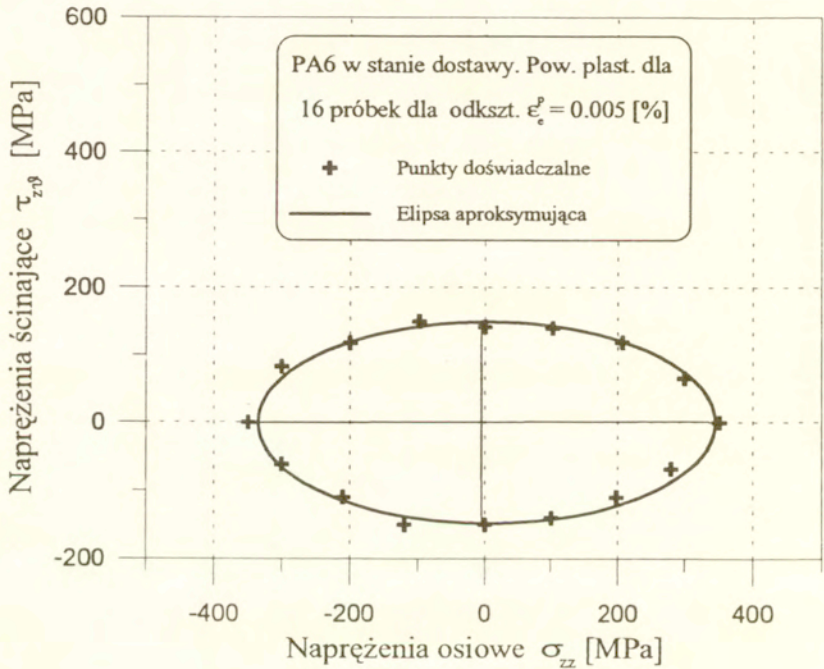


Rys. 6. Powierzchnie plastyczności wyznaczone na szesnastu próbkach dla trzech różnych definicji granicy plastyczności.

podstawie których obliczono wartości pięciu współczynników anizotropii określających, pokazaną na rysunku 7, elipsę aproksymującą powierzchnię plastyczności. W pracy przyjęto anizotropowy warunek plastyczności R.v.Misesa [17] w postaci podanej przez W.Szczepińskiego [18], uwzględniającej efekt Bauschingera. Warunek ten w odniesieniu do rozpatrywanego płaskiego stanu

naprężenia sprowadza się do pełnego równania krzywej drugiego stopnia w następującej postaci:

$$A \cdot \sigma_{zz}^2 + 2 \cdot B \cdot \sigma_{zz} \cdot \tau_{z\theta} + C \cdot \tau_{z\theta}^2 + 2 \cdot D \cdot \sigma_{zz} + 2 \cdot E \cdot \tau_{z\theta} = 1, \quad (5)$$



Rys.7. Powierzchnia plastyczności wyznaczona na podstawie aproksymacji wyników uzyskanych z obciążania szesnastu próbek (każda dla innego stanu naprężenia) dla definicji granicy plastyczności 0.005% wraz z punktami doświadczalnymi.

gdzie współczynniki A i D są określone jako funkcje wartości bezwzględnych granic plastyczności na rozciąganie Y_z i na ściskanie Z_z :

$$A = \frac{1}{Y_Z \cdot Z_Z} ; \quad D = \frac{1}{Y_Z} - \frac{1}{Z_Z} \quad (6)$$

a współczynniki C i E są określone jako funkcje wartości bezwzględnych granic plastyczności przy ścinaniu $R_{z\vartheta}$ wywołanym przez dodatnie naprężenia $\tau_{z\vartheta}$ i ścinaniu $S_{z\vartheta}$ wywołanym przez ujemne naprężenia $\tau_{z\vartheta}$:

$$C = \frac{1}{R_{z\vartheta} \cdot S_{z\vartheta}} ; \quad E = \frac{1}{R_{z\vartheta}} - \frac{1}{S_{z\vartheta}} \quad (7)$$

Współczynnik B , który jest proporcjonalny do obrotu przekroju powierzchni plastyczności względem układu współrzędnych $\sigma_{zz} - \tau_{z\vartheta}$ nie ma tak prostej interpretacji fizycznej jak pozostałe współczynniki i może być wyznaczony jedynie na podstawie doświadczeń w złożonym stanie naprężenia.

Wymiary geometryczne elipsy powyższego warunku plastyczności dla materiałów anizotropowych wyrażają się następującymi zależnościami stanowiącymi funkcje współczynników krzywej drugiego stopnia:

- współrzędne środka elipsy:

$$\alpha_{\sigma} = \frac{B \cdot E - C \cdot D}{\delta} ; \quad \alpha_{\tau} = \frac{B \cdot D - A \cdot E}{\delta} \quad (8)$$

- kąt obrotu osi elipsy w stosunku do układu współrzędnych $\sigma_{zz} - \tau_{z\vartheta}$:

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \arctan \left(\frac{2 \cdot B}{A - C} \right) \quad (9)$$

- wielka i mała oś elipsy:

$$a = \sqrt{-\frac{\Delta}{a' \cdot \delta}} ; \quad b = \sqrt{-\frac{\Delta}{b' \cdot \delta}} , \quad (10)$$

gdzie oznaczono:

$$\Delta = A \cdot C + 2 \cdot B \cdot D \cdot E - C \cdot D^2 - A \cdot E^2 - B^2 ; \quad \delta = A \cdot C - B^2$$

oraz:

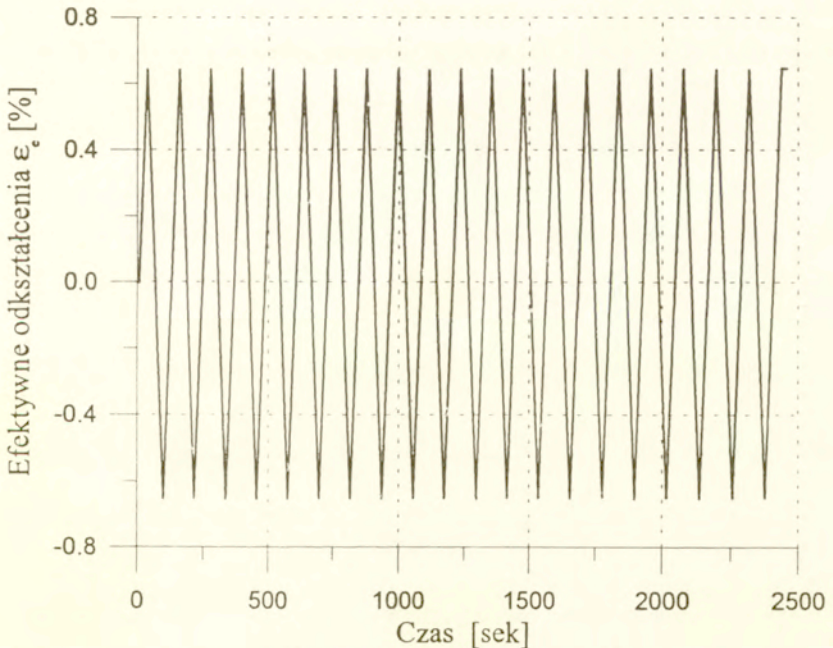
$$a' = \frac{1}{2} \left(A - C + \sqrt{(A - C)^2 + 4B^2} \right) ; \quad b' = \frac{1}{2} \left(A - C - \sqrt{(A - C)^2 + 4B^2} \right)$$

Współczynniki równania elipsy aproksymującej punkty doświadczalne obliczone są z warunku minimalizacji sumy kwadratów odległości punktów doświadczalnych od krzywej aproksymacji. Pozwala to na określenie liczbowych wartości współczynników elipsy w ogólnej postaci, a tym samym określenie anizotropowych cech badanego materiału. Wyciskany pręt ze stopu aluminium PA6, z którego wykonano próbki ma wyraźne cechy anizotropowe ukształtowane w procesie obróbki plastycznej. Bez względu na wartości umownych granic plastyczności związanych z odkształceniem plastycznym 0.005% wynoszą: $Y_z \approx Z_z = 340,6 \text{ MPa}$ i $R_{z0} \approx S_{z0} = 149,6 \text{ MPa}$, główna oś anizotropii pokrywa się z osią pręta, a stosunek granic plastyczności na rozciąganie i na ścinanie wynosi 2,28.

W pracy [15] przedstawiono również porównanie powierzchni plastyczności materiału wyznaczonej na wielu próbkach, z których każdą obciążano przy innej proporcji pomiędzy składowymi naprężeniami, a powierzchnią wyznaczoną na jednej próbce obciążanej kolejno w różnych kierunkach określonych inną proporcją pomiędzy składowymi naprężeniami, którą to powierzchnię nazwano umownie sekwencyjną powierzchnią plastyczności. Podano również wpływ historii deformacji, jakiej doznaje próbka na kolejnych kierunkach obciążania, na kształt i położenie wyznaczonej sekwencyjnej

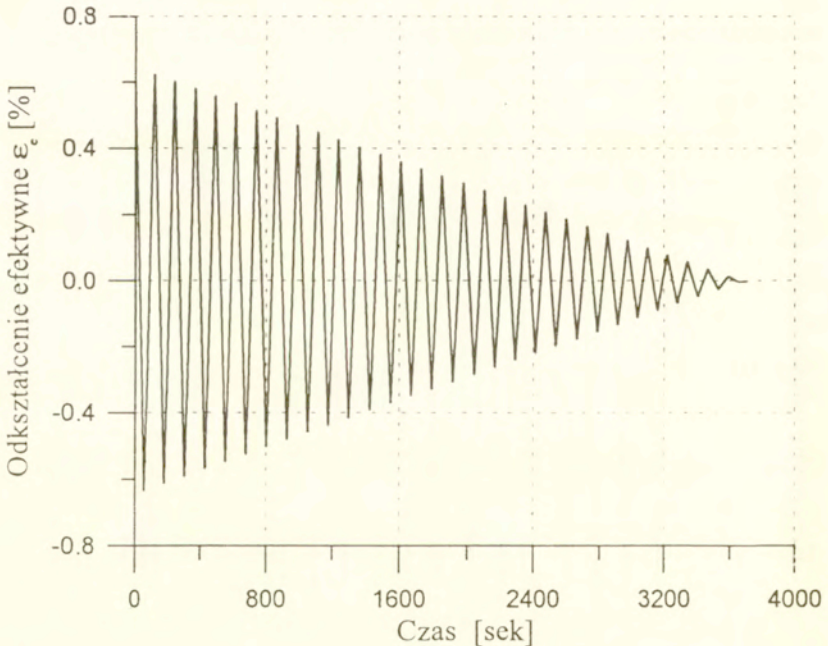
powierzchni plastyczności. Stwierdzono, że przy zachowaniu odpowiedniej procedury badań, a zwłaszcza ograniczeniu odkształceń plastycznych jakich doznaje próbka na kolejnych kierunkach obciążania, sekwencyjna powierzchnia plastyczności określa w sposób akceptowalny, z niewielkim błędem systematycznym charakterystycznym dla przyjętego sposobu sekwencyjnego obciążania próbki, kształt i położenie powierzchni plastyczności charakteryzujące właściwości mechaniczne badanego materiału.

W punkcie 3 przedstawionego wyżej programu badań realizowano cykliczne obciążanie próbki dla zadanej z góry liczby cykli. W części (a) obciążeń cyklicznych dla każdej próbki wykonano 81 ćwiartek cykli obciążeń ze stałą amplitudą odkształceń całkowitych równych $\pm 0,65\%$, jak pokazano na rys.8.



Rys.8. Program obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie realizowany dla każdego z szesnastu przyjętych kierunków.

Cykle obciążeń realizowano przy stałej prędkości odkształceń równej $2 \cdot 10^{-4} s^{-1}$. Po wykonaniu zadanej liczby cykli przy stałej amplitudzie ekwiwalentnych odkształceń całkowitych wprowadzano żadaną liczbę półcykli obciążeń o malejącej amplitudzie, punkt (b) programu obciążania próbki, w którym amplituda każdego półcyklu była zmniejszana o wartość $\Delta \epsilon_e = 0.0065/L$, gdzie L oznacza liczbę półcykli obciążenia. W pracy przyjęto $L=60$, a przebieg tego punktu programu obciążenia próbki przedstawiono na rys.9. Czas realizacji każdego półcyklu obciążenia był stały i dlatego prędkość odkształcania w kolejnym półcyklu obciążenia zmniejszała się.



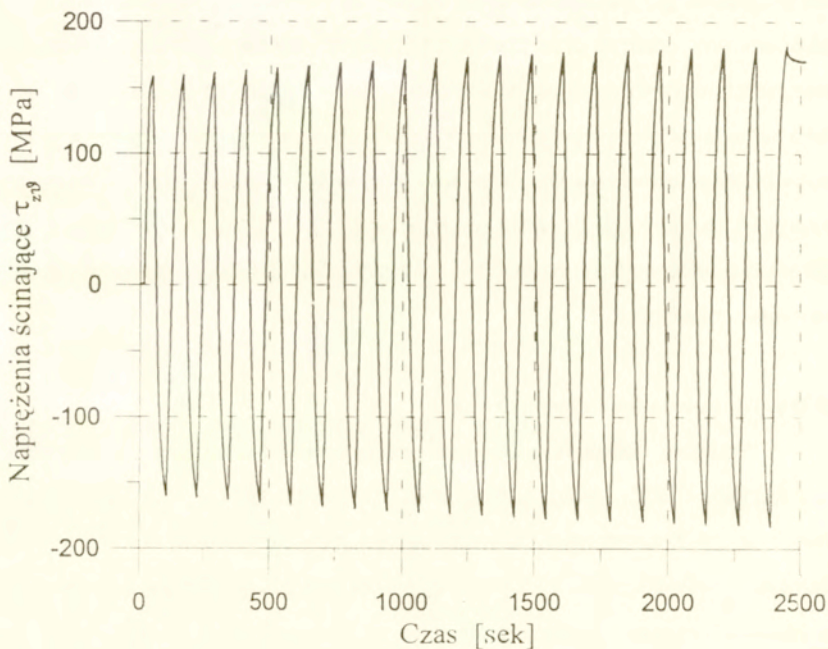
Rys.9. Program obciążeń cyklicznych o malejącej amplitudzie realizowany dla każdego z szesnastu przyjętych kierunków.

Czwarty punkt przedstawionej wyżej kolejności przebiegu programu obciążania próbki realizowano bezpośrednio po zakończeniu cyklicznego obciążania próbki. Próbka była odciążona do zerowej wartości siły osiowej i momentu skręcającego. Po wprowadzeniu do komputera programu sterującego pracą maszyny wytrzymałościowej przy obciążeniach monotonicznych realizowano proporcjonalne obciążanie próbki w kolejnych szesnastu kierunkach przestrzeni naprężeń, rozpoczynając od takiego samego kierunku jaki przyjęto w pierwszym punkcie programu obciążania (Rys.5 ilustruje przykładowo taki proces dla przypadku gdy obciążenia rozpoczynano od kierunku skręcania dodatniego). Ekwivalentne odkształcenie plastyczne, jakiego doznaje próbka na kolejnych kierunkach, ograniczone było do wartości 0.005% a prędkość odkształcenia była taka sama jak w pierwszym punkcie programu obciążania próbki. Uzyskane w ten sposób dane doświadczalne w postaci krzywych poszczególnych składowych naprężeń jako funkcji odpowiadających składowych odkształceń wykorzystano do określenia sekwencyjnej powierzchni plastyczności materiału poddanego wstępnej deformacji plastycznej.

4. Wyniki doświadczeń i ich dyskusja

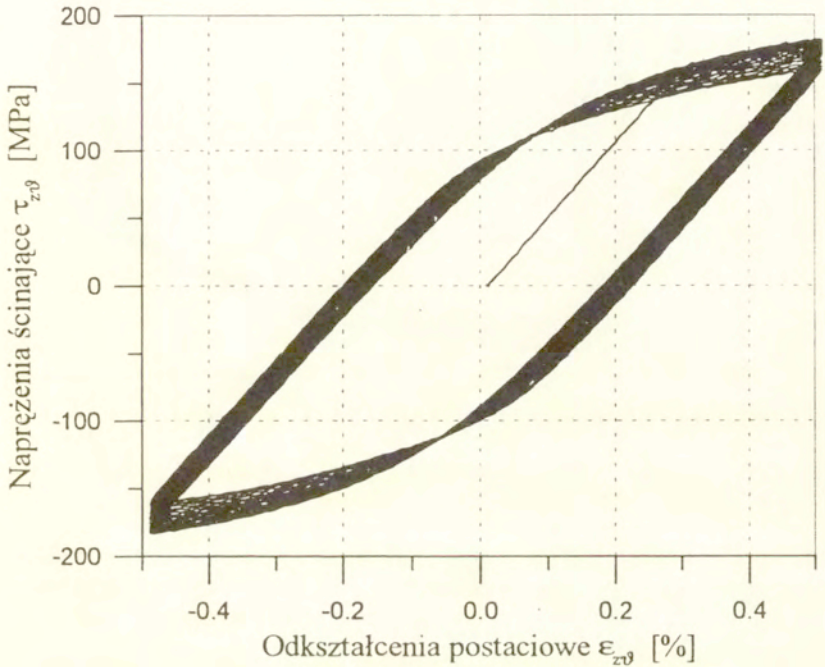
Przebieg obciążeń cyklicznych rejestrowano przy pomocy dodatkowego wielokanałowego, cyfrowego układu akwizycji danych pomiarowych firmy *Peekel* (rys.1) z taką częstotliwością próbkowania, aby było możliwe odtworzenie przebiegu doświadczenia w każdym cyklu z dostateczną dokładnością, zwłaszcza w zwrotnych punktach poszczególnych cykli. Zbiór punktów doświadczalnych dla jednej składowej naprężenia bądź odkształcenia zawierał w przybliżeniu 9000 danych liczbowych. Przykładowy komplet schematów przebiegu obciążeń cyklicznych dla próbki poddanej dwukierunkowemu skręcaniu począwszy od skręcania w kierunku dodatnim przedstawiono na kolejnych rysunkach od 10 do 15. Przykładową odpowiedź materiału w naprężeniach jako funkcji czasu na

zadany parametr sterujący (odkształcenia - rys. 8) pokazano na rys. 10. W pierwszych dziesięciu cyklach zwiększają się równomiernie po każdym cyklu wartości naprężeń odpowiadających zwrotnym punktom realizowanych cykli odkształceń o wartość $1,64 \text{ MPa}$, następnie obserwuje się monotoniczne zmniejszanie się przyrostu naprężenia po każdym cyklu do wartości $0,6 \text{ MPa}$ w cyklu ostatnim. Wskazuje to na stopniową stabilizację pętli histerezy, ale po dwudziestu wykonanych cyklach nie uzyskuje się jeszcze stanu nasycenia i każdy następny cykl różni się od poprzedniego, chociaż poczynając od cyklu dziesiątego



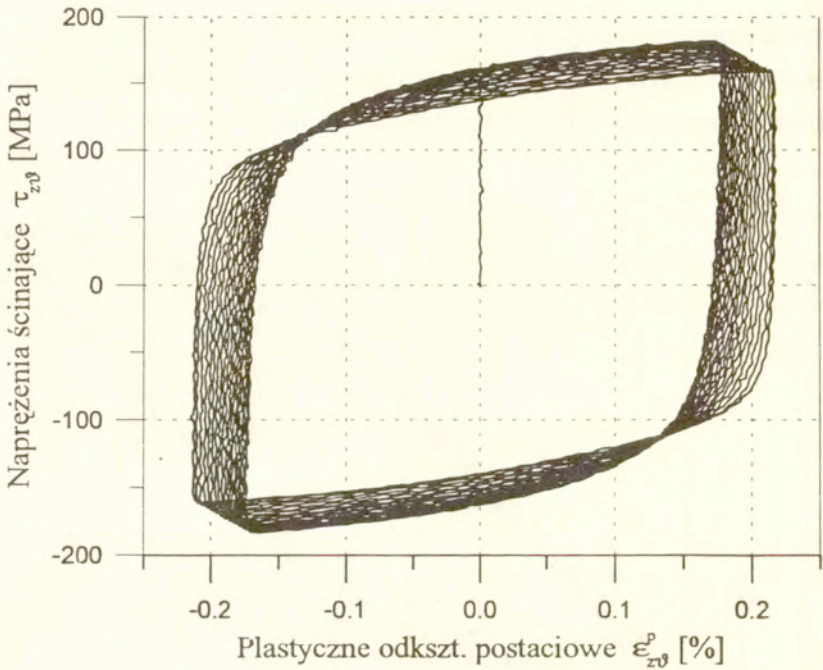
Rys. 10. Przykładowa odpowiedź materialu w naprężeniach jako funkcji czasu na sterowany w odkształceniach program cykli o stałej amplitudzie, pokazany na Rys. 8.

maleją w każdym cyklu przyrosty amplitudy naprężeń. Zmniejszają się też wartości amplitudy odkształceń plastycznych w każdym kolejnym cyklu od wartości 0,22% w cyklu pierwszym do wartości 0,18% w cyklu ostatnim.



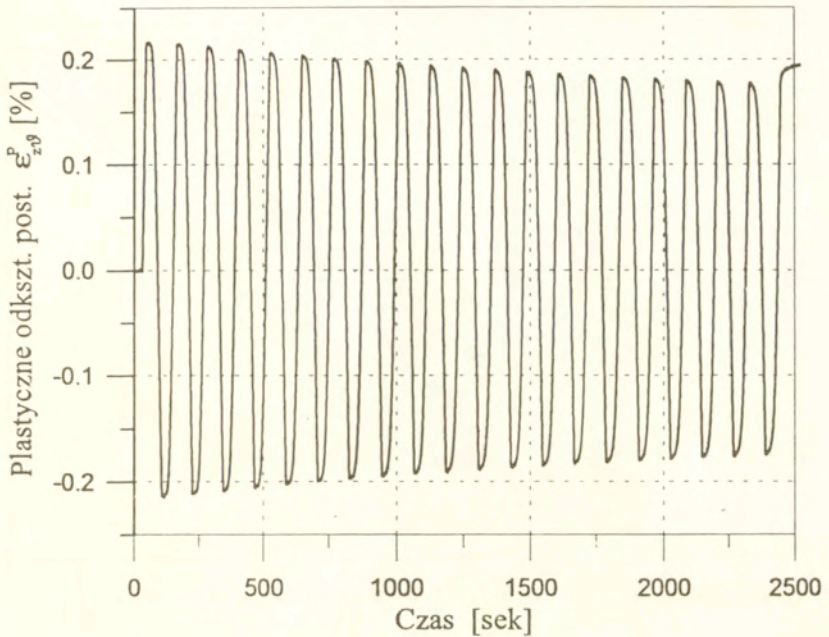
Rys.11. Przykładowy przebieg programu obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie dla jednego kierunku (90°) wyrażony w postaci wykresu zmian naprężenia w funkcji odkształceń całkowitych.

Przebieg zależności naprężenie-odkształcenie całkowite dla części (a) programu obciążeń cyklicznych dla wybranej próbki pokazano na rys.11. Natomiast na rys.12 przedstawiono analogiczny wykres odpowiadający składowej plastycznej odkształceń postaciowych. Można zaobserwować niewielkie różnice pomiędzy pętlami histerezy plastycznej w końcowych cyklach co świadczy o zbliżaniu się do



Rys.12. Przykładowy przebieg programu obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie dla jednego kierunku (90°) wyrażony w postaci wykresu zmian naprężenia w funkcji odkształcenia plastycznych. Widoczne zbliżanie się do pętli cyklu ustalonego.

do cyklu ustalonego. Potwierdza to przebieg wielkości odkształceń plastycznych jako funkcji czasu dla tej samej próbki, zamieszczony na rys. 13. Obserwuje się systematyczne zmniejszanie się, poczynając od cyklu dziesiątego, różnic amplitudy odkształceń plastycznych w dwóch kolejnych cyklach. Różnica ta wynosząca około $0,0025\%/cykl$ dla pierwszych 10 cykli zmniejsza się do wartości $0,0013\%/cykl$ w cyklu dwudziestym. Prezentację wyników, ze względu na ich dużą ilość, ograniczono tylko do jednej próbki. Zachowanie pozostałych próbek, obciążanych cyklicznie wzdłuż innych proporcjonalnych dróg, jest jakościowo

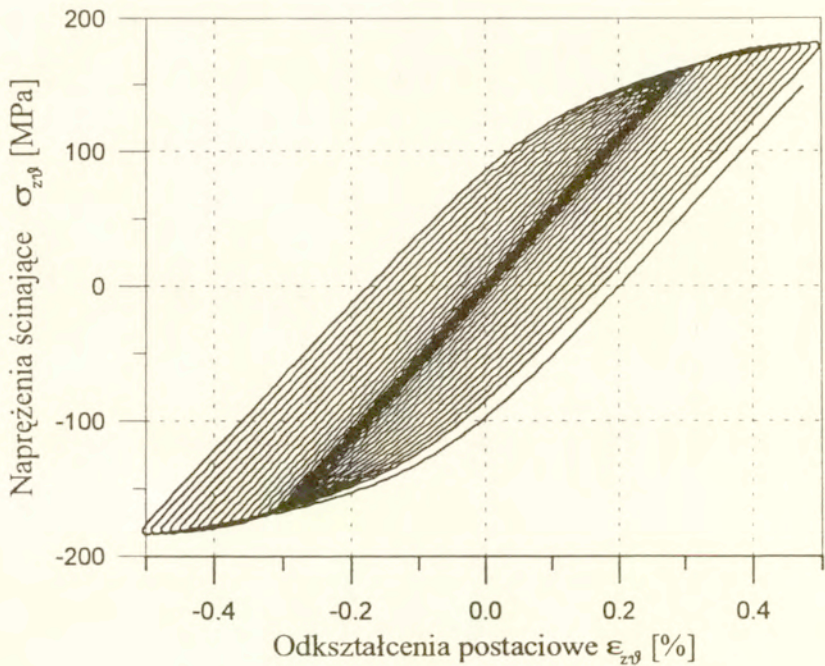


Rys.13. Przebieg odkształceń plastycznych w funkcji czasu przy cyklicznym obciążeniu ze stałą amplitudą odkształceń całkowitych.

podobne przy prezentacji w układzie ekwiwalentne naprężenia-ekwiwalentne odkształcenia i nie wnosi nic nowego.

Wyniki doświadczeń rejestrowane w trakcie punktu (b) programu obciążeń cyklicznych przy stopniowo malejącej amplitudzie odkształceń całkowitych pokazano również dla tej samej, dwukierunkowo skręcanej, próbki w postaci zmniejszających się stopniowo pętli histerezy wykresów naprężeń ścinających jako funkcji odkształceń całkowitych (rys.14) i jako funkcji odkształceń plastycznych (rys.15).

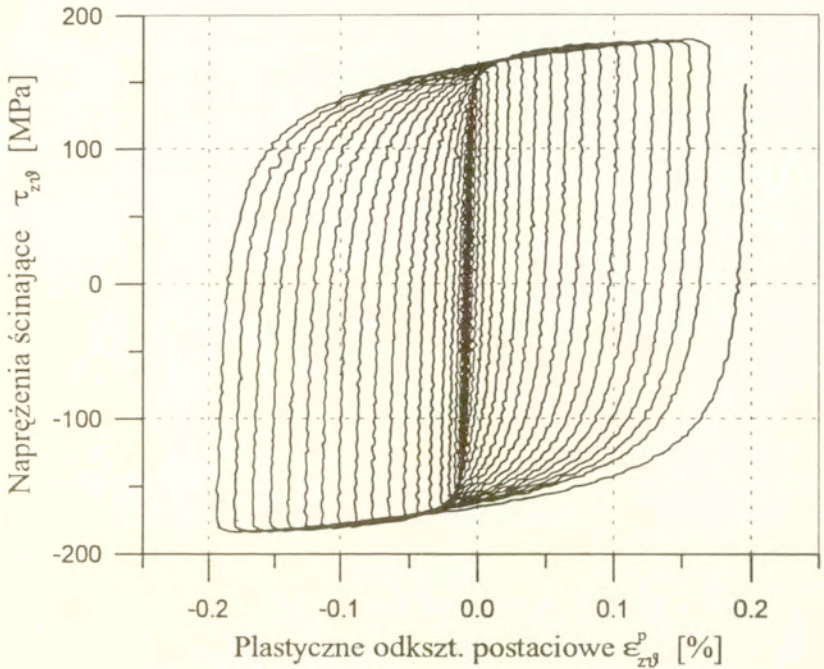
Pełny program cyklicznego obciążania próbek wykorzystywany był jako obciążenie wstępne, po którym w punkcie czwartym określano jego wpływ na



Rys.14. Przykładowy przebieg programu obciążeń cyklicznych o malejącej amplitudzie dla jednego kierunku (90°), wyrażony w postaci wykresu naprężeń w funkcji odkształceń całkowitych.

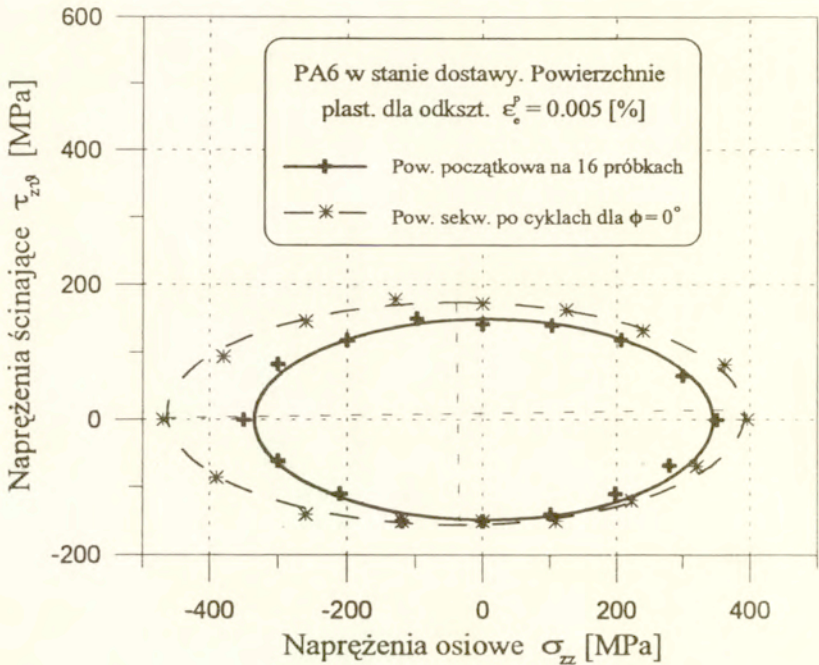
zmianę anizotropowych własności badanego stopu aluminium. Natomiast wybór schematu cyklicznej deformacji dla kolejnych kierunków nie był przypadkowy i miał na celu określanie tzw. krzywych szkieletowych i analizę cyklicznych plastycznych własności materiału, co jest przedmiotem oddzielnej pracy [19].

Czwarty punkt programu badań miał na celu wyznaczenie sekwencyjnych powierzchni plastyczności dla materiału poddanego uprzedniej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach w rozpatrywanej przestrzeni naprężeń. Powierzchnie te wyznaczono zgodnie z procedurą opisaną szczegółowo w



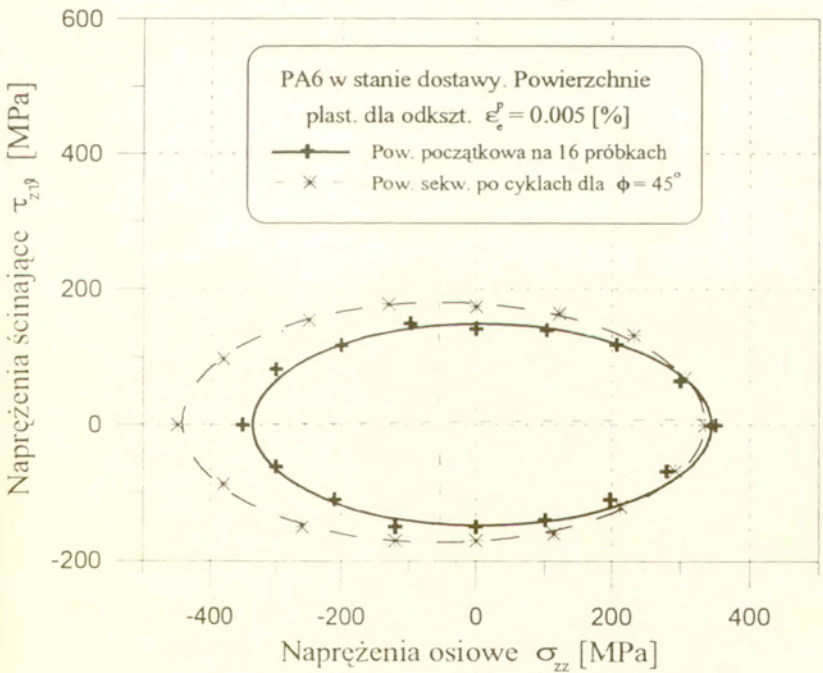
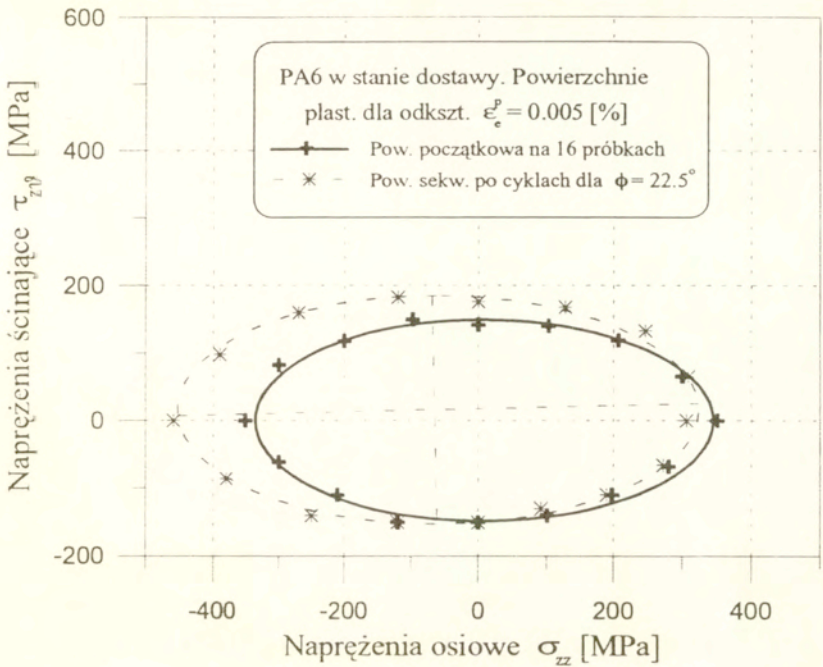
Rys.15. Przykładowy przebieg programu obciążeń cyklicznych o malejącej amplitudzie dla jednego kierunku (90°), wyrażony w postaci wykresu naprężeń w funkcji odkształceń plastycznych.

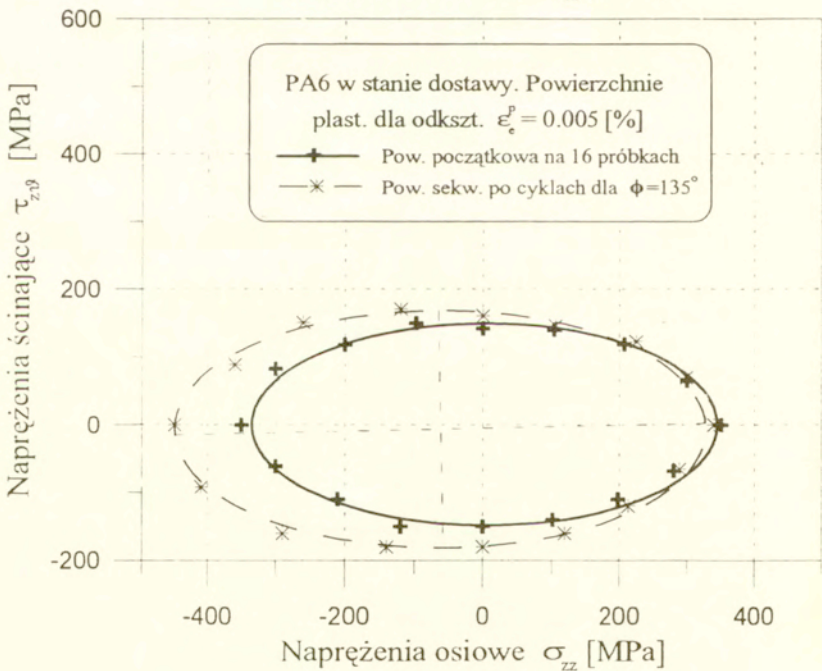
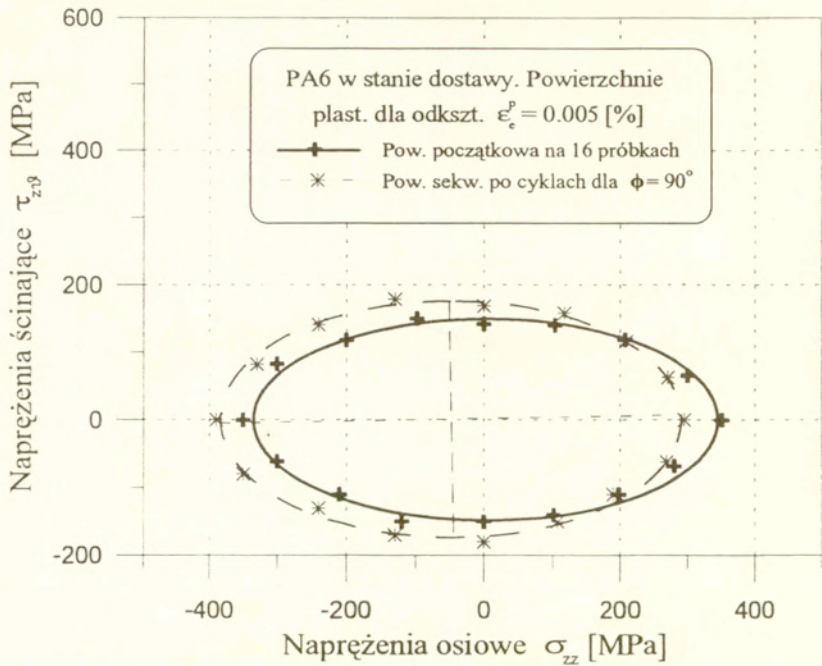
cytowanej już pracy [15]. Sekwencyjne powierzchnie plastyczności otrzymane dla materiału poddanego deformacji cyklicznej zaznaczono liniami przerywanymi na kolejnych rysunkach od 16 do 28, odpowiadających różnym kierunkom wstępnej deformacji cyklicznej jakim była uprzednio poddana próbka. Prezentacja wyników jest ograniczona, ponieważ nie dla wszystkich kierunków uzyskano powierzchnie plastyczności. Dla uwidocznienia wpływu kierunku wstępnej deformacji cyklicznej na kształt i położenie powierzchni plastyczności na rysunkach tych zaznaczono linią ciągłą powierzchnię plastyczności materiału w stanie dostawy uzyskaną na

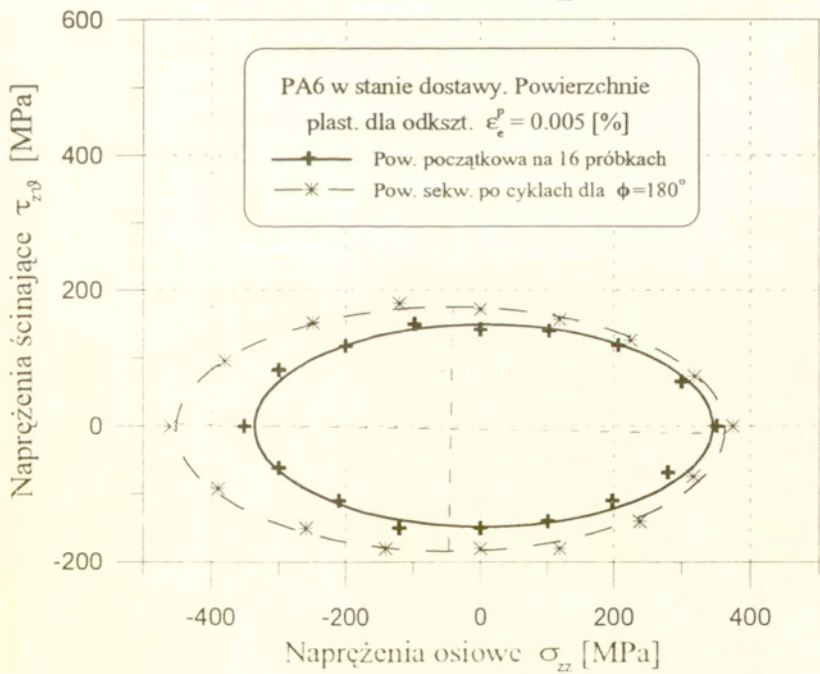
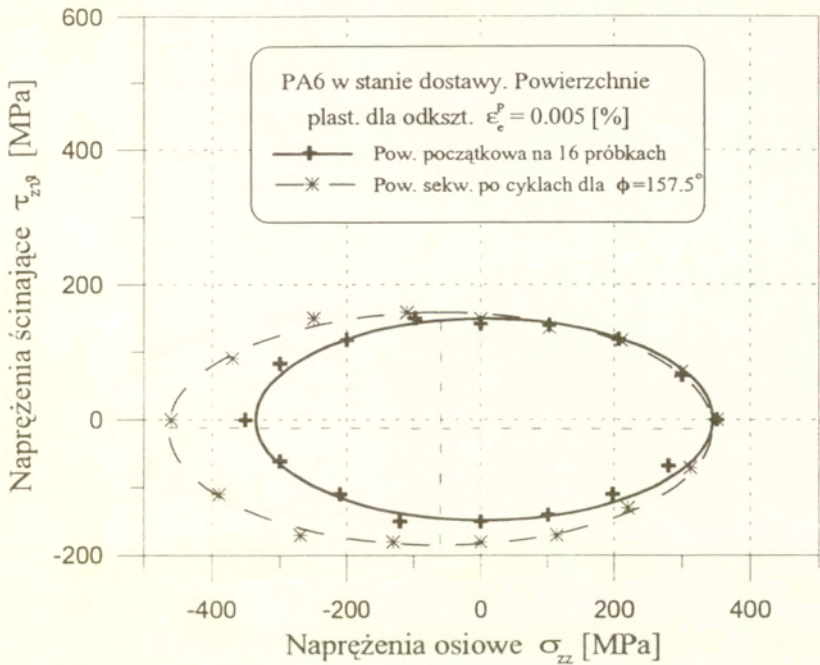


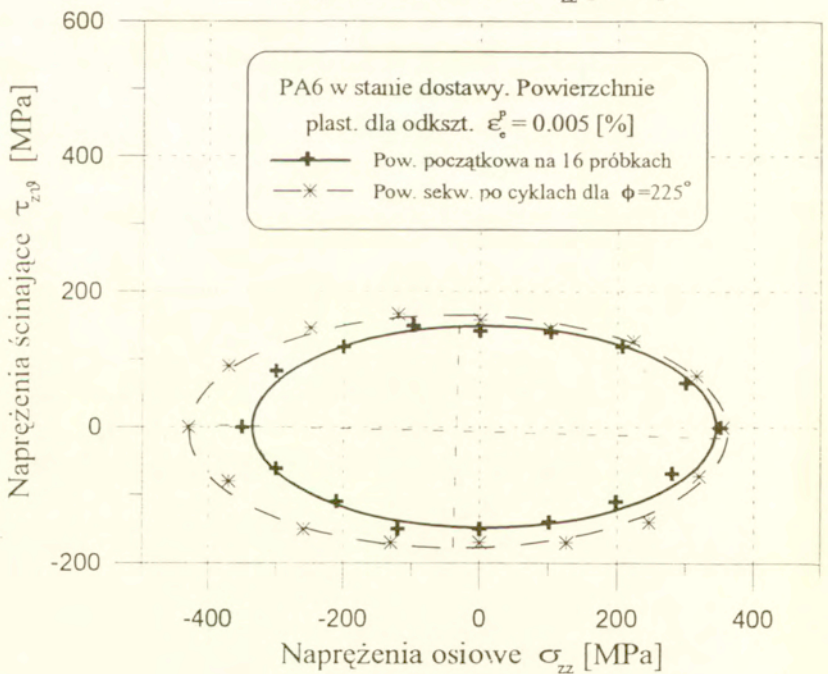
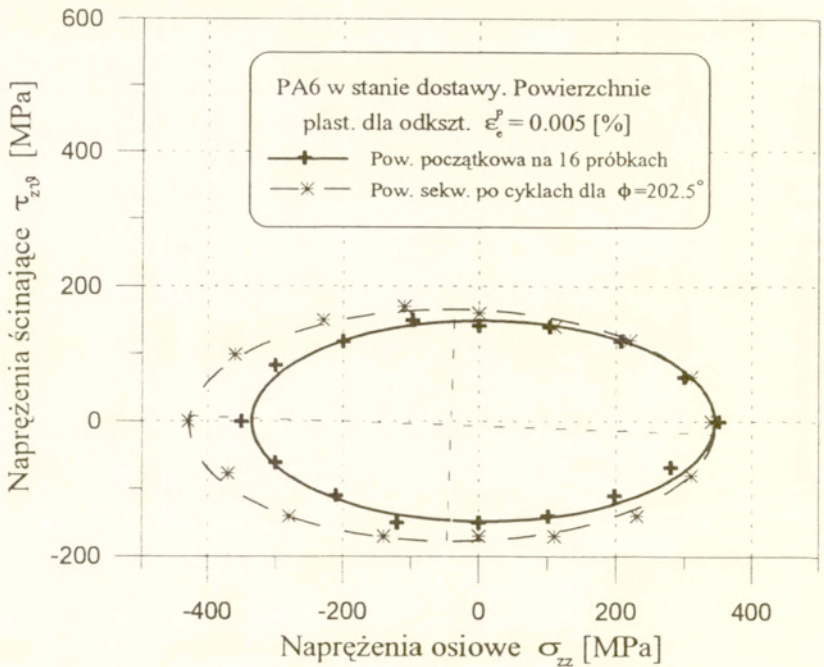
Rys. 16 - 28. (Kolejne rysunki na następnych stronach). Porównanie początkowej powierzchni plastyczności określonej z szesnastu próbek obciążanych wzdłuż różnych dróg proporcjonalnych z powierzchniami plastyczności wyznaczonymi sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału poddanego wstępnej cyklicznej plastycznej deformacji odpowiednio w kierunkach: 0 ; 22.5 ; 45 ; 90 ; 135 ; 157.5 ; 180 ; 202.5 ; 225 ; 247.5 ; 270 ; 292.5 ; 337.5°.

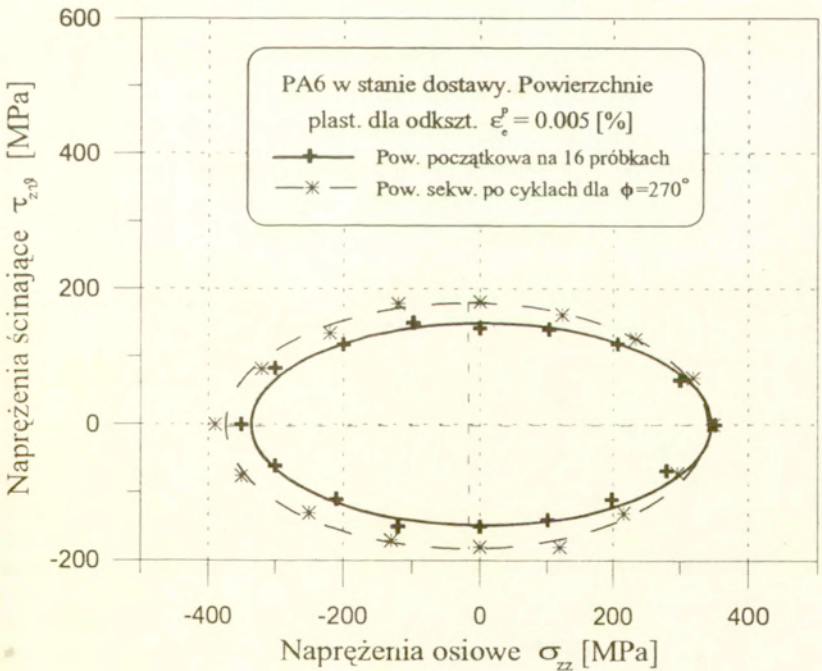
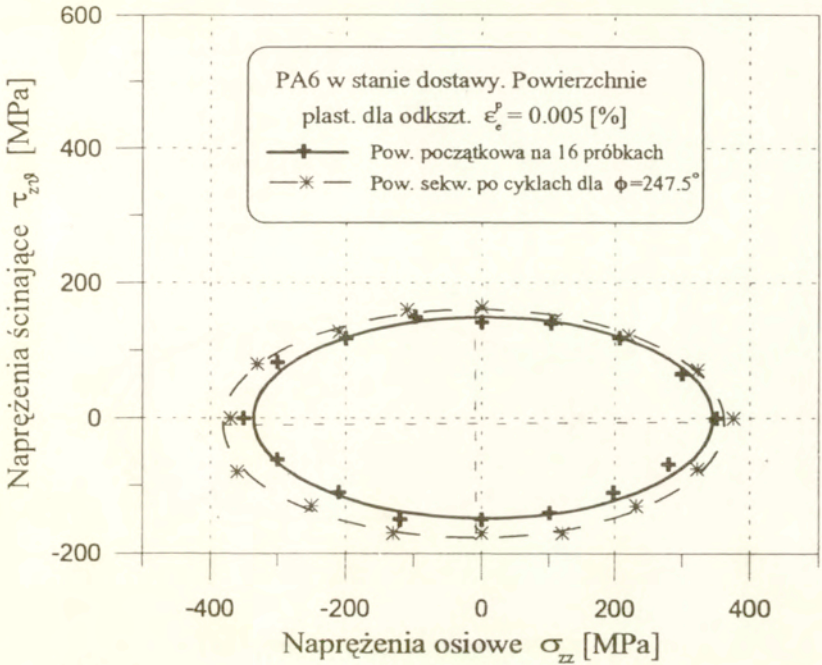
szesnastu próbkach [15], którą przytoczono na rys.7. Zarówno powierzchnia plastyczności dla materiału w stanie dostawy jak i sekwencyjne powierzchnie plastyczności dla materiału poddanego różnokierunkowej cyklicznej deformacji plastycznej dotyczą takiej samej umownej granicy plastyczności odpowiadającej ekwiwalentnemu odkształceniu plastycznemu równemu 0,005%. We wszystkich przypadkach zaznaczono położenie punktów doświadczalnych stanowiących podstawę obliczenia współczynników równania (5) elipsy aproksymującej.

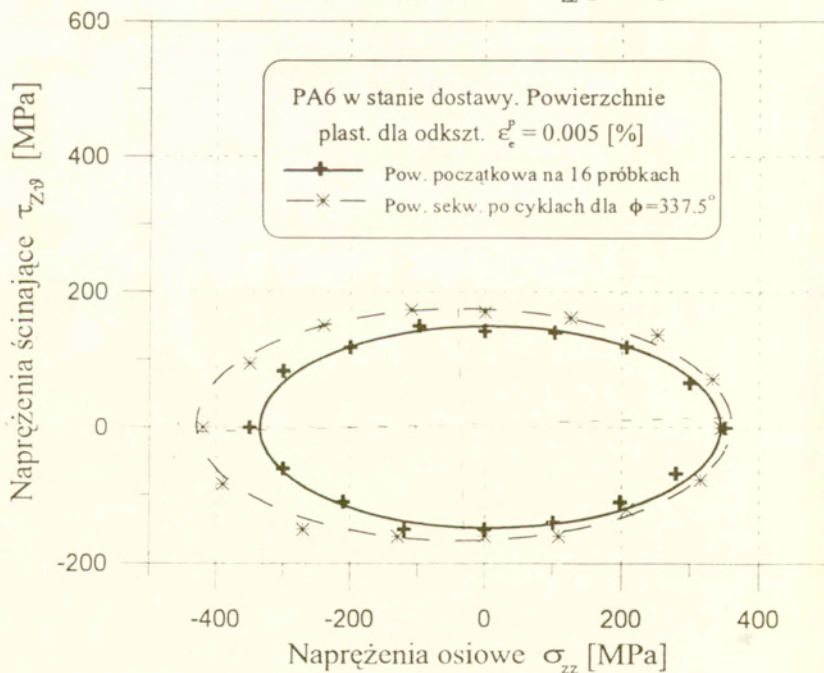
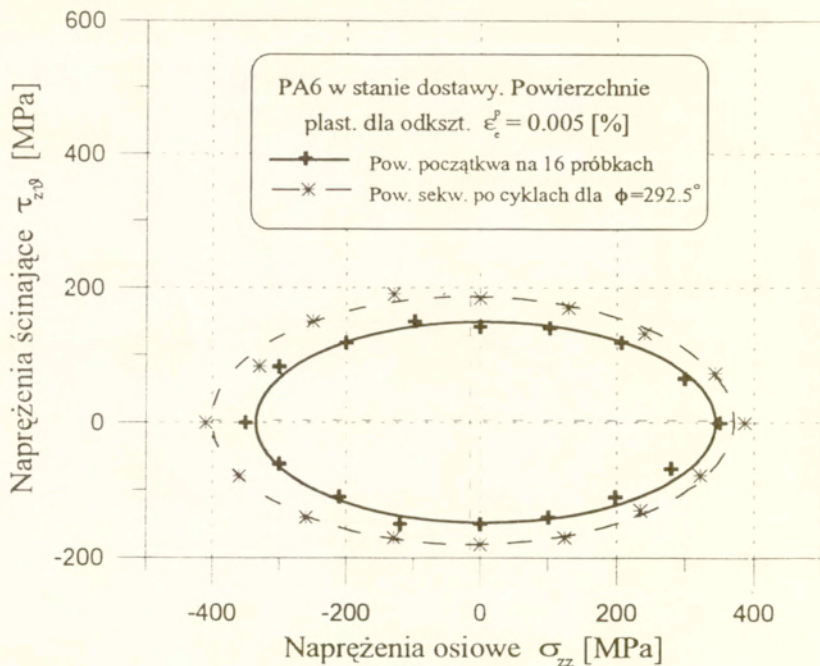


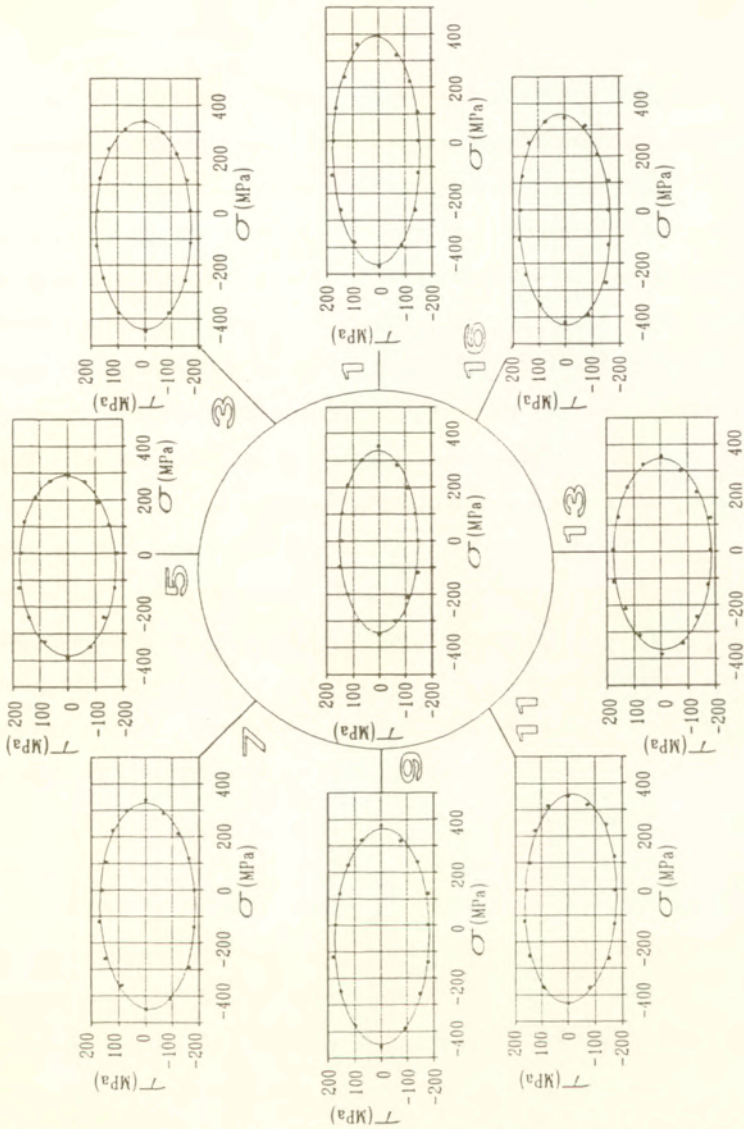










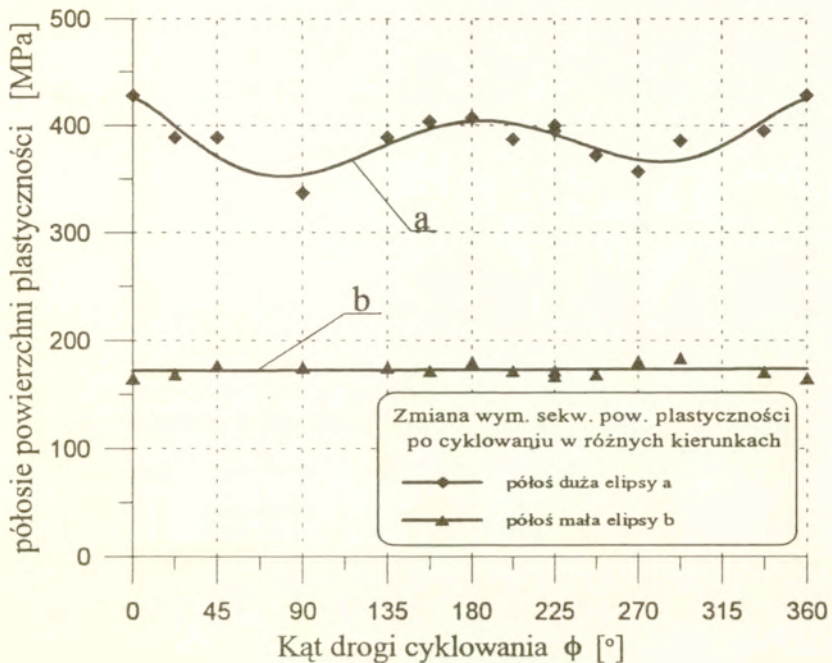


Rys.29. Zestawienie sekwencyjnych powierzchni plastyczności dla stopu aluminium PA6 określonych na jednej próbce po obciążeniach cyklicznych dla każdego z pokazanych kierunków. Numery od 1 do 16 określają powierzchnie dla materiału cyklowanego w kierunkach odpowiednio od 0 do 337.5° według programu pokazanego na rys.4 (wzrostowi numeru o 1 odpowiada wzrost kąta o 22.5°). W środku umieszczono powierzchnie otrzymane dla materiału w stanie dostawy uzyskane w drodze testowania wielu próbek. Zestawienie obejmuje powierzchnie dla offsetu 0.005 %.

Wstępne obciążanie cykliczne powoduje powiększenie wymiarów powierzchni plastyczności i zmianę jej proporcji wymiarowych w stosunku do powierzchni plastyczności dla materiału wyjściowego. Największy wzrost wymiaru elipsy występuje w kierunku zgodnym z kierunkiem wstępnego obciążenia cyklicznego, natomiast w kierunku prostopadłym do kierunku tego wstępnego obciążenia cyklicznego zmiana wymiaru elipsy jest najmniejsza. Wstępne obciążenie cykliczne w różnych kierunkach nie wywołuje obrotu powierzchni plastyczności i główna oś anizotropii pokrywająca się z osią pręta, związana z teksturą materiału ukształtowaną w trakcie obróbki plastycznej jakiej doznał materiał w procesie wytwórczym, nie ulega zmianie.

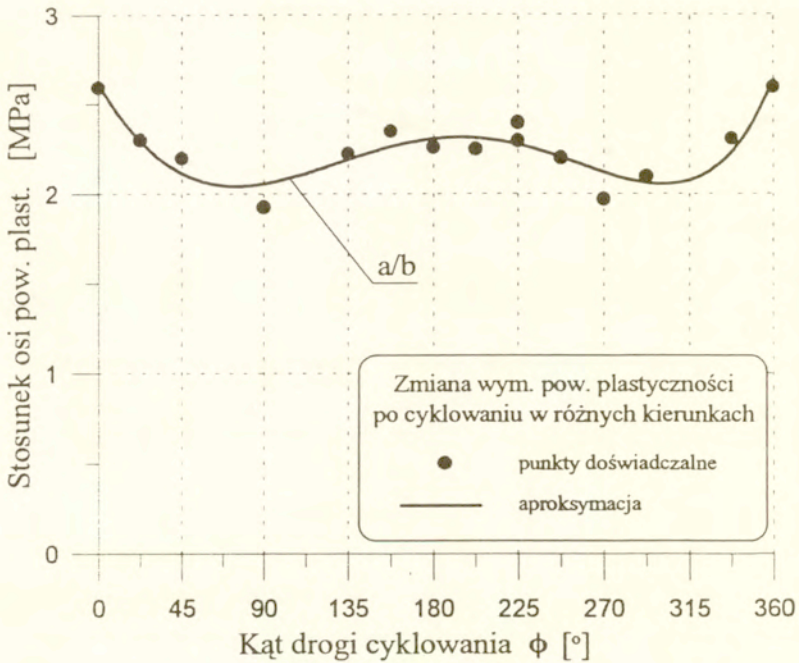
Wpływ kierunku wstępnych obciążeń cyklicznych na kształt i położenie powierzchni plastyczności uwidoczniono na zbiorczym rys.29, gdzie wokół początkowej powierzchni plastyczności znajdującej się w środkowym kółku pokazano powierzchnie plastyczności dla materiału poddanego obciążeniom cyklicznym w kilku wybranych, różnych kierunkach. Zmiana proporcji wymiarowych tych powierzchni plastyczności i stałość kierunku ich głównych półosi są tu wyraźnie widoczne.

Wartości wymiarów wielkiej a i małej b półosi elipsy powierzchni plastyczności po wstępnym obciążeniu cyklicznym jako funkcje kąta ϕ kierunku proporcjonalnej drogi wstępnych obciążeń cyklicznych przedstawiono na rys.30. Na rysunku tym zaznaczono punkty doświadczalne dla sekwencyjnych powierzchni plastyczności przedstawionych na rys.16 - 28 oraz aproksymowane przebiegi tych punktów. Wielka półoś a tych elips jest największa dla próbek poddanych wstępnym obciążeniom cyklicznym w kierunku osi podłużnej próbki a najmniejsza dla próbek obciążanych wstępnie przy dwukierunkowym skręcaniu (kątem ϕ równy 90° i 270°). Charakterystyczna jest natomiast niezależność małej półosi b elips, aproksymujących powierzchnię plastyczności materiału po wstępnym obciążeniach cyklicznych, od kierunku ϕ tych obciążeń cyklicznych.



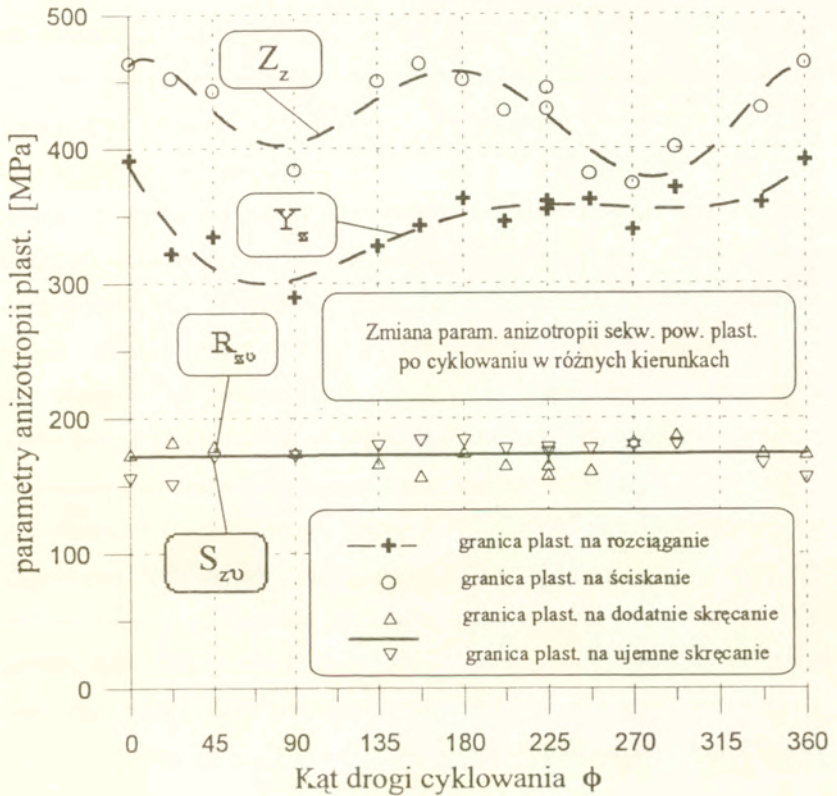
Rys.30. Wykres zmian wielkiej (a) i małej (b) półosi powierzchni plastyczności odpowiadającej odkształceniom 0.005 % dla materiału wstępnie obciążonego cyklicznie w zależności od kierunku tych obciążeń.

Stosunek obu półosi elips przedstawiony na rys.31 zmienia się, zależnie od kąta kierunku obciążenia cyklicznego, od wartości około 2,6 dla kierunku osi próbki do wartości około 2 dla kierunku rewersyjnego skręcania. Stosunek ten wynosił 2,28 dla materiału w stanie dostawy, który nie był poddany wstępnym obciążeniom cyklicznym. Tak więc wstępne obciążenie cykliczne w kierunku prostopadłym do głównej osi anizotropii materiału w stanie początkowym powoduje zmniejszenie stosunku a/b a wstępne obciążenie cykliczne, w kierunku zgodnym z kierunkiem głównej osi anizotropii materiału w stanie początkowym, powoduje powiększenie wartości a/b w stosunku do stanu początkowego.



Rys.31. Wykres zmian stosunku wielkiej i małej półosi powierzchni plastyczności, odpowiadającej odkształceniom 0.005 %, dla materiału wstępnie obciążonego cyklicznie wzdłuż dróg określonych kątem ϕ .

Zmiany umownych granic plastyczności na ściskanie Z_z i na rozciąganie Y_z oraz na ścinanie w kierunku dodatnich naprężeń ścinających $R_{z\phi}$ i ujemnych naprężeń ścinających $S_{z\phi}$ dla materiału po wstępnych obciążeniach cyklicznych jako funkcje kąta ϕ drogi tych proporcjonalnych obciążeń cyklicznych przedstawiono na rys.32. Różnice wartości umownych granic na ścinanie dla różnych wartości kąta ϕ są nieznaczne i wynikają raczej z przyjętej techniki sekwencyjnego wyznaczania powierzchni plastyczności, a nie z regularnej zależności od kąta ϕ . Natomiast granice plastyczności na ściskanie i rozciąganie są zależne od kąta ϕ kierunku wstępnych obciążeń cyklicznych. Widoczna na rysunku nieregularność ułożenia



Rys.32 Przebiegi zmian parametrów anizotropii uzyskanych przy identyfikacji stałych określających sekwencyjne powierzchnie plastyczności dla materiału poddanego obciążeniom cyklicznym wzdłuż dróg określonych przez kąt ϕ .

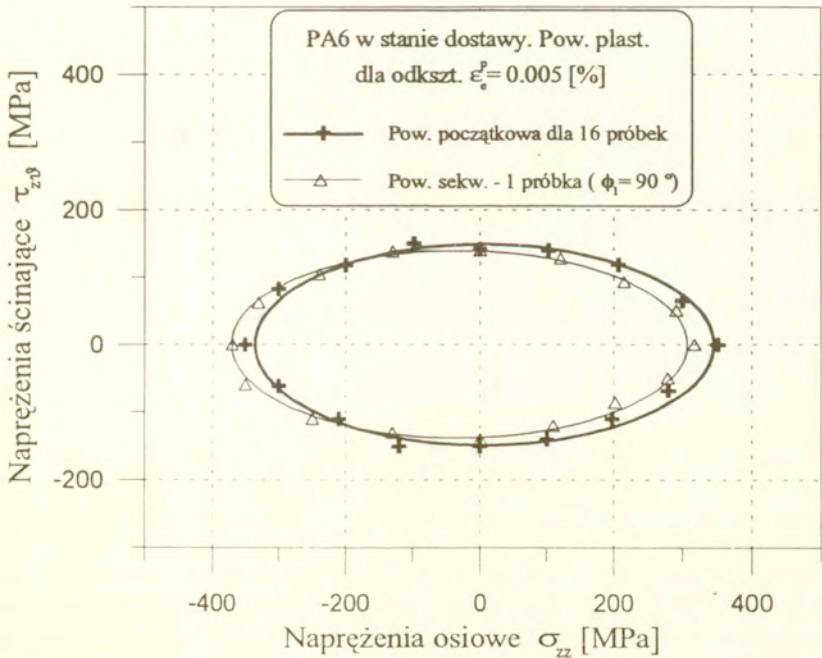
punktów doświadczalnych dla granicy plastyczności na rozciąganie powinna być raczej przypisana rozrzutom doświadczalnym wynikającym z różnic pomiędzy próbkami i przyjętego sposobu wyznaczenia powierzchni plastyczności. Wartości granic plastyczności przy rozciąganiu i ściskaniu są największe dla materiału poddanego wstępnej deformacji cyklicznej w kierunku osi próbki a najmniejsze dla materiału poddanego wstępnej deformacji cyklicznej przy dwukierunkowym

skręcaniu. Stosowane w pracy wstępne obciążenia cykliczne w kierunku osi próbki powodują zwiększenie o około 37% granicy plastyczności na ściskanie, o około 20% granicy plastyczności na rozciąganie oraz o około 10% granicy plastyczności na ścinanie w stosunku do odpowiadających granic plastyczności dla materiału nie poddanego wstępnym obciążeniom cyklicznym. Natomiast analogiczne obciążenia cykliczne realizowane przy dwukierunkowym skręcaniu powodują zwiększenie o około 10% granic plastyczności na ścinanie i na ściskanie i powodują tylko niewielkie zmiany granicy plastyczności na rozciąganie w stosunku do odpowiadających granic plastyczności dla materiału nie poddanego wstępnym obciążeniom cyklicznym. Zmiany pozostałych parametrów charakteryzujących położenie powierzchni plastyczności dla materiału poddanego obciążeniom cyklicznym w różnych kierunkach są nieznaczne i są związane z przyjętym w pracy sposobem sekwencyjnego wyznaczania powierzchni plastyczności. Kąt obrotu elips aproksymujących powierzchnie plastyczności dla całego zakresu zmienności kąta ϕ kierunku drogi obciążeń cyklicznych zawarty jest w przedziale $\pm 1^\circ$ a średnie wartości współrzędnych środka tych elips wynoszą: $\alpha_x = 0$ i $\alpha_y = -30\text{MPa}$.

W kolejnym etapie badań przeprowadzono porównanie wpływu deformacji plastycznej wywołanej obciążeniami monotonicznymi i cyklicznymi dla sekwencyjnych powierzchni plastyczności. Jak pokazano w pracy [15] powierzchnie tego typu obarczone są pewnym błędem systematycznym, wynikającym z akumulacji odkształceń próbki obciążanej w kolejnych kierunkach płaszczyzny naprężeń (σ_x, τ_{xy}). Ilustracją tego błędu jest rys.33, na którym cienką linią ciągłą zaznaczono sekwencyjną powierzchnię plastyczności materiału w stanie dostawy w zestawieniu z powierzchnią wyznaczoną na 16 próbkach. W obu przypadkach zaznaczono również punkty doświadczalne. Widoczne różnice tych dwóch elips, aproksymujących punkty doświadczalne, stanowią błąd

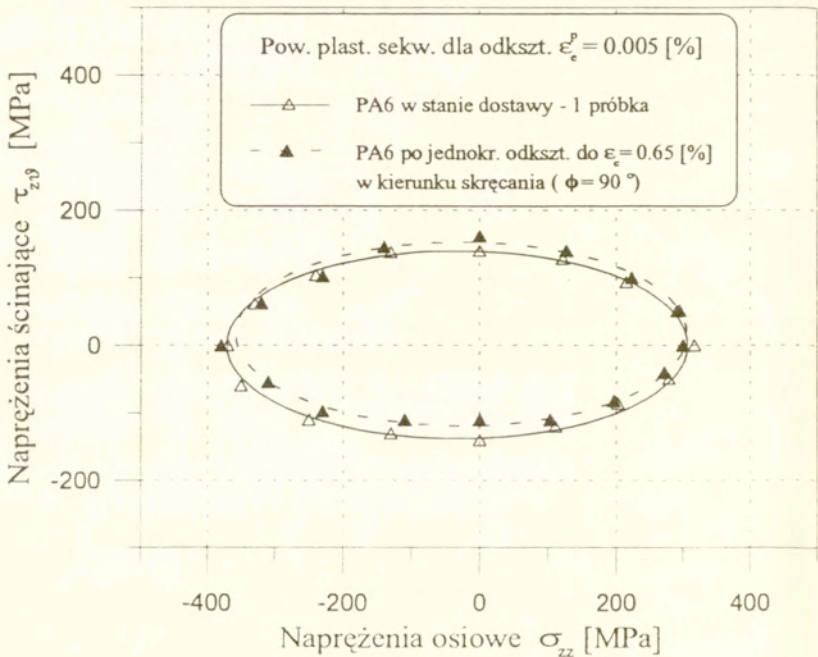
systematyczny sekwencyjnego sposobu wyznaczania powierzchni plastyczności. Błąd ten jednak jest nieistotny gdy porównywane są powierzchnie sekwencyjne wyznaczone według jednakowej procedury nakłuwania.

W celu porównania zmian powierzchni plastyczności wywołanych wstępnym obciążeniem cyklicznym w stosunku do zmian wywołanych wstępnym odkształceniem zrealizowanym przy obciążeniu monotonicznym przygotowano dodatkową próbkę, którą obciążono przy skręcaniu w kierunku oznaczonym umownie jako 90° do wartości ekwiwalentnych odkształceń całkowitych równych $0,65\%$ a więc takich samych jak stosowano przy obciążeniach cyklicznych.



Rys.33. Porównanie powierzchni plastyczności określonej na wielu próbkach z powierzchnią wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce, dla materiału w stanie dostawy, przy definicji granicy plastyczności 0.005 %.

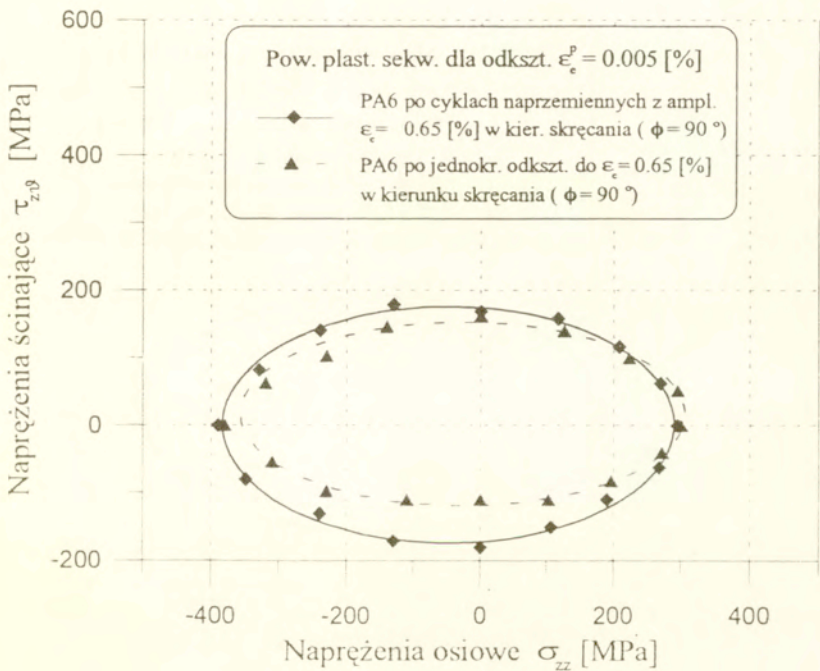
Do porównań celowo wybrano testy, w których wstępną deformację zadawano przez skręcanie, które jest najmniej podatne na wpływ zmian geometrycznych próbki w trakcie jej obciążania. Porównanie przeprowadzono dla powierzchni plastyczności, w których pierwszym kierunkiem sekwencji obciążania, do wartości ekwiwalentnych odkształceń plastycznych równych 0,005%, było skręcanie w kierunku oznaczonym jako 90°.



Rys.34. Porównanie powierzchni plastyczności określonych sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału w stanie dostawy oraz wstępnie odkształconego do wartości odkształceń całkowitych 0,65% przez monotoniczne skręcanie w kierunku 90°. Powierzchnie wyznaczone dla offsetu 0,005 %.

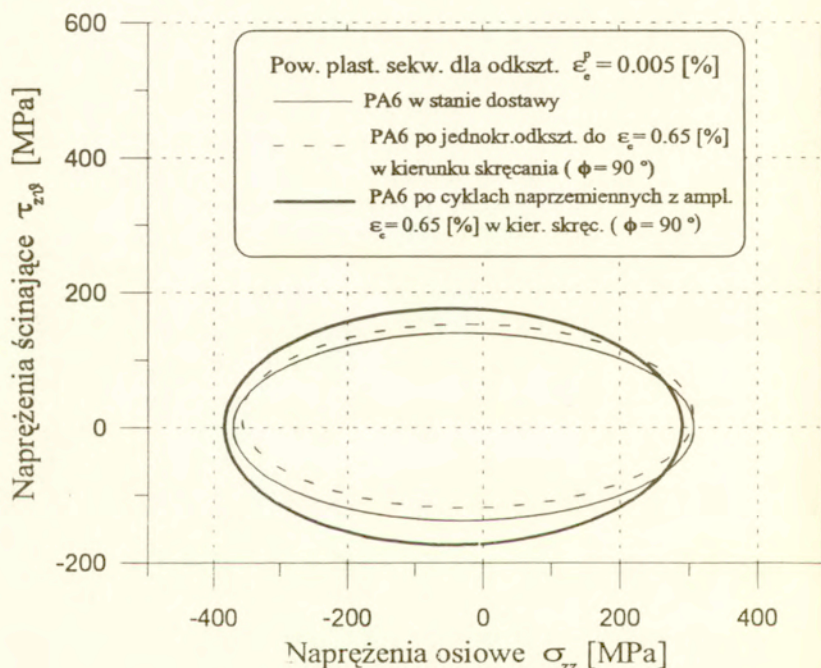
Porównanie sekwencyjnych powierzchni plastyczności dla materiału w stanie dostawy (linia ciągła) i po wstępnym, monotonicznym skręceniu próbki do

całkowitych odkształceń równych 0,65% (linia przerywana) pokazano na rys.34. Widoczne jest nieznaczne przesunięcie powierzchni plastyczności w kierunku wstępnej deformacji, praktycznie bez zmiany jej wymiarów. Natomiast na rys.35 pokazano sekwencyjne powierzchnie plastyczności dla materiału poddanego wstępnemu skręcaniu monotonicznemu (linia przerywana) i cyklicznemu (linia ciągła) do tej samej wartości odkształceń całkowitych. W przeciwieństwie do wstępnych odkształceń przy obciążeniu monotonicznym, cykliczne obciążenie



Rys.35 Porównanie powierzchni plastyczności określonych sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału wstępnie odkształconego do wartości odkształceń całkowitych 0.65% przez monotoniczne skręcanie oraz cykliczne skręcanie w kierunku 90° . Powierzchnie wyznaczone dla offsetu 0.005%.

próbki w tym samym zakresie odkształceń powoduje zwiększenie wymiaru powierzchni plastyczności w kierunku wstępnej deformacji cyklicznej. Charakter zmian powierzchni plastyczności pod wpływem obciążeń monotonicznych i cyklicznych w takim samym zakresie odkształceń całkowitych zilustrowano na rys.36, gdzie pokazano elipsy aproksymujące trzy powierzchnie plastyczności dla materiału bez deformacji wstępnej oraz po wstępnej deformacji monotonicznej i cyklicznej.



Rys.36. Porównanie powierzchni plastyczności określonych sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału w stanie dostawy i wstępnie odkształconego do wartości odkształceń całkowitych 0.65% przez monotoniczne skręcanie oraz cykliczne skręcanie w kierunku 90° . Powierzchnie wyznaczono dla granicy plastyczności 0.005 %.

5. Wnioski

1. Wstępne obciążenia cykliczne realizowane w złożonym stanie naprężenia powodują zmiany wymiarów i proporcji wymiarowych powierzchni plastyczności badanego stopu aluminium PA6 zależne od kierunku tych wstępnych obciążeń cyklicznych w przestrzeni naprężeń.
2. Wstępne obciążenia cykliczne realizowane w złożonym stanie naprężenia nie powodują zmiany kierunku głównej osi anizotropii pokrywającej się z osią wyciśniętego pręta badanego stopu aluminium PA6 a związanej z teksturą ukształtowaną w trakcie procesu obróbki plastycznej.
3. Kierunek wstępnego obciążenia cyklicznego ma wpływ tylko na wymiar wielkiej osi elipsy odwzorowującej powierzchnię plastyczności, a nie wpływa na wymiar małej osi tej elipsy.
4. Największe zmiany wymiarów elipsy aproksymującej powierzchnię plastyczności stopu aluminium PA6 występują dla wielkiej osi elipsy pod wpływem wstępnych obciążeń cyklicznych w kierunku osi próbki pokrywającej się z kierunkiem początkowej anizotropii badanego materiału.
5. Najmniejsze zmiany wymiarów elipsy aproksymującej powierzchnię plastyczności stopu aluminium PA6 występują dla małej osi elipsy pod wpływem wstępnych obciążeń cyklicznych o orientacji niezależnej od wyboru kierunku w przestrzeni naprężeń.
6. W przeciwieństwie do obciążeń monotonicznych, które w rozpatrywanym zakresie odkształceń powodują jedynie przesunięcie powierzchni plastyczności w kierunku wstępnej deformacji, obciążenia cykliczne o takiej samej amplitudzie odkształceń powodują powiększenie wymiarów powierzchni plastyczności.

Podziękowanie

Autorzy wyrażają podziękowanie Komitetowi Badań Naukowych za finansowanie pracy wykonanej w ramach grantu nr 3 0154 91 01.

Literatura cytowana w pracy

1. W. Szczepiński, L. Dietrich, J. Miastkowski: Plastic Properties of Metals, in Experimental Methods in Mechanics of Solids, W. Szczepiński ed., PWN-Elsevier, 1990.
2. W. Szczepiński, 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, 153-162, 1968.
3. A. Phillips, C.S. Liu, J.W. Justusson, An Experimental Investigation of Yield Surfaces at Elevated Temperatures, *Acta Mechanica*, 14, 119-146, 1972.
4. K. Ikegami, Y. Nittsu: Effect of Creep Prestrain on Subsequent Plastic Deformation, *Int. J. Plasticity*, 1, 331-345, 1985.
5. D.E. Helling, A.K. Miller, M.G. Stout: An Experimental Investigation of the Yield Loci of 1100-0 Aluminum, 70:30 Brass, and an Overaged 2024 Aluminum Alloy After Various Prestrains, *J. Eng. Mat. and Tech.*, 108, 313, 1986.
6. K. Mallick, Shyam K. Samanta, A. Kumar: An Experimental Study of the Evolution of Yield Loci for Anisotropic Materials Subjected to Finite Shear Deformation, *J. Eng. Mat. and Tech.*, 113, 192, 1991.
7. Chr. Boller, T. Seeger: *Materials Data for Cyclic Loading*, Elsevier, 1987.
8. R. Marjanovic, W. Szczepiński: Yield Surfaces of the M-63 Brass Prestrained by Cyclic Biaxial Loading, *Arch. Mech.*, 26, 311-320, 1974.
9. M. Śliwowski, K. Turski: Wpływ cyklicznej plastycznej deformacji na powierzchnię plastyczności, *Mech. Teor. Stos.*, 3, 12, 1974.
10. J. Miastkowski: Yield Surface of Material Subjected to Combined Cyclic Loading, *Arch. Mech.*, 30, 203-215, 1978.
11. H. Ishikawa, K. Sasaki: Yield Surfaces of SUS304 Under Cyclic Loading, *J.Eng.Mat.Techn.*, 110, 364-371, 1988.

12. A. Benallal, P. LeGallo, D. Marquis: An Experimental Investigation of Cyclic Hardening of 316 Stainless Steel and of 2024 Aluminium Alloy Under Multiaxial Loading, Nucl. Eng. Des., 114, 345-353, 1989.
13. N. Ohno: Recent Topics in Constitutive Modelling of Cyclic Plasticity and Viscoplasticity, Appl.Mech.Rev., 43, 11, 283-295, 1990.
14. A. Benallal, S. Callach, C. Laborderie, D. Marquis: Hardening of Metals Under Cyclic Nonproportional Loadings in Tension-Torsion and Triaxial Tension, Proc. Mecamat 92, Multiaxial Plasticity, Cachan, France, 836-842, 1992.
15. L. Dietrich, R. Kiryk, G. Socha, M. Śliwowski: Identyfikacja plastycznej anizotropii stopu aluminium, w druku, 1994.
16. L. Dietrich: Doświadczalne określenie anizotropii metali, w druku, 1994.
17. R. v. Mises: Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen, Zeitschr. angew. Math. Mech., Band 8, Heft 3, 161-185, 1928.
18. W. Szczepiński: On Deformation-induced Plastic Anisotropy of Sheet Metals, Arch. Mech., 45, 1, 3-38, 1993.
19. M. Śliwowski, Z.L. Kowalewski, G. Socha: Określanie cyklicznego zachowania stopu aluminium na podstawie krzywych szkieletowych w płaskim stanie naprężenia , w druku, 1994.