

5.17.10. — obciążenia jedno-
i wielosiowe

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

CHARAKTERYSTYKA CYKLICZNYCH
WŁAŚCIWOŚCI STOPU ALUMINIUM
NA PODSTAWIE BADAŃ
W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻENIA

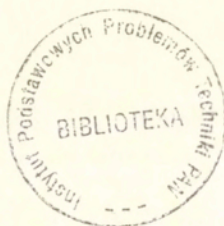
29/1994

P.269



WARSZAWA 1994

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 14 października 1994 r.



56620



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 3,0 Ark. druk. 4,0
Oddano do drukarni w październiku 1994 r.

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

Lech DIETRICH
Zbigniew L. KOWALEWSKI
Marek ŚLIWOWSKI
Grzegorz SOCHA

Zakład Wytrzymałości Materiałów

CHARAKTERYSTYKA CYKLICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI STOPU ALUMINIUM NA PODSTAWIE BADAŃ W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻENIA

Streszczenie

Celem pracy jest doświadczalne określenie właściwości stopu aluminium, oznaczonego zgodnie z polską normą symbolem PA6, poddanego wstępnym obciążeniom cyklicznym w złożonym stanie naprężenia. Właściwości te są scharakteryzowane krzywymi szkieletowymi otrzymanymi dla różnych stanów naprężenia. Badania przeprowadzono na cienkościennych próbkach rurkowych w płaskim stanie naprężenia realizowanym przez różne kombinacje siły osiowej i momentu skręcającego. Właściwości materiału w stanie dostawy oceniono w rozpatrywanej przestrzeni naprężeń na podstawie przekroju powierzchni plastyczności wyznaczonej na wielu próbkach, z których każda była obciążana przy innym stanie naprężenia. Wyznaczone doświadczalnie obrazy początkowych powierzchni plastyczności odpowiadających różnym umownym definicjom uplastycznienia stanowiły odniesienie do porównań zmian własności materiału pod wpływem celowo wprowadzanej deformacji cyklicznej.

Krzywe szkieletowe wyznaczone dla różnych stanów naprężeń wykorzystano do określenia tzw. cyklicznej powierzchni plastyczności, obrazującej podatność materiału do zmian właściwości w zakresie plastycznym pod wpływem obciążeń cyklicznych realizowanych w różnych kierunkach rozpatrywanej przestrzeni naprężeń.

Przyjęty program obciążeń cyklicznych, zawierający ustalone liczby cykli obciążenia o stałej i malejącej stopniowo w kolejnych cyklach amplitudzie odkształceń całkowitych, wywoływał w badanym stopie aluminium efekt wzmocnienia w stosunku do stanu początkowego. Przeprowadzone badania wykazały, że badany materiał, o wyraźnie ukształtowanej anizotropii początkowej, wykazywał pod wpływem obciążeń cyklicznych nierównomierną zdolność do wzmocnienia zależnie od kierunku działania obciążeń cyklicznych.

1. Wstęp

Istotną cechą materiałów konstrukcyjnych jest ich zachowanie się przy cyklicznym obciążaniu w zakresie niskocyklowego zmęczenia. Są to obciążenia przekraczające w niewielkim stopniu granicę plastyczności materiału i wywołują w każdym cyklu odkształcenia plastyczne o malejącej stopniowo amplitudzie. Zmniejszanie się wartości odkształceń plastycznych generowanych w kolejnych cyklach obciążeń o stałej amplitudzie naprężeń lub odkształceń całkowitych doprowadza w rezultacie do stabilizacji pętli histerezy. Materiał uzyskuje w ten sposób stabilizację właściwości mechanicznych przy cyklicznych obciążeniach o zadanej amplitudzie naprężeń lub odkształceń całkowitych. W dalszych cyklach nie pojawia się już przyrost amplitudy odkształceń plastycznych i nie zmieniają się też współrzędne zwrotnych punktów krzywych naprężenie - odkształcenie. Te zwrotne punkty ustalonej pętli histerezy dla różnych amplitud naprężenia lub odkształcenia całkowitego wyznaczają krzywą cykliczną zwaną też krzywą szkieletową [1], która charakteryzuje zachowanie się materiału przy cyklicznych obciążeniach i jest wykorzystywana do obliczeń numerycznych wyęzonych elementów konstrukcyjnych narażonych na obciążenia cykliczne, w takich dziedzinach jak lotnictwo, energetyka, budowa maszyn, gdzie uwzględnia się zarówno względy wytrzymałościowe jak i ilość niezbędnego materiału do wytworzenia danej części. Wyniki badań materiałowych przy obciążeniach cyklicznych mają więc w tych dziedzinach bezpośrednie znaczenie praktyczne. Wyniki takich badań mają też ogólniejsze znaczenie jako podstawa matematycznego modelowania zachowania się materiałów konstrukcyjnych pod wpływem różnego rodzaju obciążeń.

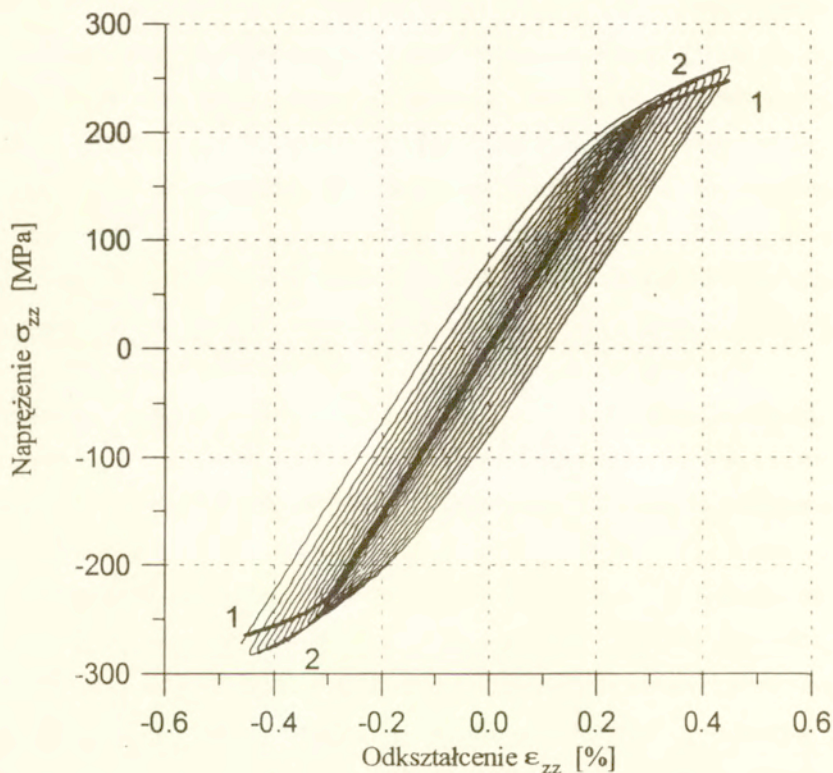
Badania doświadczalne zachowania metali przy cyklicznych obciążeniach w zakresie niskocyklowego zmęczenia stanowią jeden z istotnych problemów mechaniki plastycznych deformacji. Większość takich badań była prowadzona przy jednoosiowych stanach naprężenia. Badania wpływu obciążeń cyklicznych zadawanych w warunkach złożonego stanu naprężenia są znacznie skromniej reprezentowane w literaturze światowej [2, 3, 4]. Jednak w ostatnim okresie

obserwuje się wzrost liczby prac doświadczalnych w złożonym stanie naprężenia dotyczących zwłaszcza efektów dodatkowego wzmocnienia materiału wywołanego nieproporcjonalnym obciążeniem cyklicznym [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Rozwój takich badań jest ściśle związany z rozwojem wieloosiowych maszyn wytrzymałościowych sterowanych przy pomocy komputerów jak również z rozwojem technik cyfrowej rejestracji danych umożliwiającymi ich dalsze przetwarzanie.

Efekty cyklicznego obciążania metali w zakresie plastycznym w jednoosiowych stanach naprężeń są dobrze znane i udokumentowane [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. Dane doświadczalne obrazujące charakterystyki różnych materiałów przy cyklicznych obciążeniach w postaci krzywych szkieletowych stanowiących miejsca geometryczne punktów zwrotnych ustalonych pętli histerezy zostały opublikowane w wielotomowej monografii [19]. Natomiast brak jest danych doświadczalnych umożliwiających ocenę wpływu obciążeń cyklicznych w różnych, złożonych stanach naprężenia, zwłaszcza dla materiałów o wyraźnie ukształtowanej teksturze stanowiącej o jego anizotropowych właściwościach wytrzymałościowych.

Wykonane w tej pracy badania doświadczalne w złożonym stanie naprężenia miały na celu wyznaczenie szkieletowych krzywych naprężenie-odkształcenie przy proporcjonalnym obciążaniu w różnych kierunkach rozpatrywanej przestrzeni naprężeń dla stopu aluminium PA6. Wyznaczone krzywe szkieletowe, charakteryzujące właściwości mechaniczne materiału przy cyklicznych obciążeniach, wykorzystano do oceny wpływu kierunku obciążeń cyklicznych, odniesionego do głównej osi anizotropii materiału w stanie początkowym, na ewolucję cyklicznych i plastycznych właściwości materiału i na zmianę jego współczynników anizotropii. Pojęcie krzywej cyklicznej wprowadzono [1] w celu scharakteryzowania zachowania się materiału przy cyklicznych obciążeniach po osiągnięciu stabilizacji przejawiającej się powtarzalnymi cyklami naprężeń jako funkcji odkształceń. Wynikająca stąd definicja krzywej cyklicznej [1, 6, 7] określa jej przebieg jako miejsce geometryczne zwrotnych punktów ustalonych pętli histerezy plastycznej uzyskanych przy różnych amplitudach naprężeń lub odkształceń. Tak otrzymaną konstrukcję geometryczną

porównuje się często z monotoniczną krzywą materiałową, co pozwala ocenić czy mamy do czynienia z materiałem cyklicznie wzmacniającym się (krzywa szkieletowa - 2 przebiega powyżej zależności materiałowej - 1), jak to zilustrowano na rys.1 przedstawiającym przykładowy wynik uzyskany w pracy dla osiowej składowej naprężenia w teście wykonywanym dla kierunku 45° w rozpatrywanej przestrzeni naprężeń, czy cyklicznie osłabiającym się (krzywa cykliczna przebiega poniżej zależności materiałowej) bądź też niewrażliwym na cykliczną deformację.



Rys.1 Przykładowa ilustracja sposobu otrzymywania krzywej cyklicznej (szkieletowej) i jej porównanie z krzywą naprężenie-odkształcenie przy monotonicznym obciążaniu.

Z podanej powyżej definicji wynika, że podstawowym sposobem określania krzywej cyklicznej jest metoda z wykorzystaniem wielu próbek, z których każda poddana jest symetrycznym cyklom obciążenia o innej amplitudzie. Każdy z testów wykonywany jest przy ilości cykli zapewniającej stabilizację pętli histerezy plastycznej. Dla pewnych materiałów stabilizacja ta następuje stosunkowo szybko (rzędu kilkudziesięciu cykli), w innych przypadkach wymaga czasów odpowiadających połowie okresu trwałości zmęczeniowej. Metoda ta wymaga wielu identycznych próbek i stosunkowo długich czasów na wykonanie testów, dlatego stosowana jest rzadko do określania wzorcowej krzywej cyklicznej (szkieletowej). W praktyce stosuje się często alternatywne procedury z użyciem jednej próbki. Wyróżnić tu można pięć następujących sposobów:

1. *Sposób stopniowanych bloków obciążeń cyklicznych* - w którym po doprowadzeniu do stabilizacji pętli histerezy rozpoczyna się następny blok obciążenia o stałej amplitudzie. Stwierdzono, że sekwencja bloków od dużych do małych amplitud odkształcenia w blokach daje lepszą zgodność z krzywą cykliczną wyznaczoną na wielu próbkach.
2. *Sposób przyrostowy* - w którym próbki obciążane są cyklicznie z określoną częstotliwością w powtarzających się blokach, których amplituda liniowo narasta i maleje (przebieg trójkątny). Jest to jeden z tzw. szybkich sposobów określania krzywej cyklicznej, gdzie odkształcenia plastyczne metalu stabilizują się po kilku takich blokach. Próbę uznaje się za zakończoną jeśli różnice między krzywymi cyklicznymi otrzymanymi przy rosnących i malejących odkształceniach w bloku są pomijalnie małe.
3. *Sposób polegający na monotonicznym rozciąganiu po cyklicznym odkształcaniu* - w którym próbka jest monotonicznie rozciągana po uprzednim ustabilizowaniu cyklicznej plastycznej deformacji. Przebieg krzywej monotonicznej jest, jak się przyjmuje, na ogół zbliżony do krzywej szkieletowej [1].
4. *Sposób indywidualnej pętli histerezy* - w którym, jak to podał Morrow w pracy [17], pojedyncza pętla histerezy w stanie ustalonym zostaje przekształcona przez

inwersję, jeżeli współrzędne opisujące pętlę podzielić przez 2. Należy podkreślić, że metoda ta nie dla wszystkich materiałów daje dobre wyniki [18].

5. *Sposób dekrementalny* - w którym po uprzednim doprowadzeniu do ustabilizowanej pętli histerezy przy wybranej stałej amplitudzie odkształceń następuje obciążanie próbki w cyklach o malejącej stopniowo w każdym cyklu amplitudzie naprężeń lub odkształceń całkowitych. Ilość cykli jest tak dobierana aby zapewnić określenie krzywej szkieletowej z żadaną dokładnością. Metoda ta była stosowana w pracy [5] do rejestracji krzywych cyklicznych przy różnych nieproporcjonalnych drogach cyklicznego obciążania.

Sposób dekrementalny zastosowano także w niniejszej pracy do określenia krzywych szkieletowych dla różnych proporcjonalnych dróg obciążania w przestrzeni odkształceń. Zasadniczym celem pracy było określenie tzw. „cyklicznych powierzchni granicznych” dla wybranych zakresów odkształceń trwałych na zarejestrowanych doświadczalnie krzywych cyklicznych w złożonym stanie naprężenia. Zastosowano tu analogię do znanej powszechnie metody określania powierzchni plastyczności na wielu próbkach. Cykliczna powierzchnia graniczna jest umownym pojęciem odzwierciedlającym zdolność materiału do umocnienia lub osłabienia pod wpływem obciążeń cyklicznych realizowanych w różnych kierunkach rozpatrywanej przestrzeni naprężeń. Cykliczna powierzchnia graniczna nie opisuje właściwości mechanicznych materiału poddanego wstępnej deformacji cyklicznej w określonym kierunku, ale może być stosowana do oceny wpływu kierunku i wartości wstępnej deformacji cyklicznej na właściwości mechaniczne materiału. Jej położenie w stosunku do początkowej powierzchni plastyczności może stanowić podstawę oceny wrażliwości materiału na kierunek deformacji cyklicznej w stosunku do osi półwyrobu, z którego wykonano próbki.

W dalszej części pracy tak wyznaczone powierzchnie nazywano zamiennie „cyklicznymi powierzchniami plastyczności” aczkolwiek należy podkreślić, że opisują one zachowanie materiału w stanie ustabilizowanej, cyklicznej deformacji w zakresie plastycznym w złożonym stanie naprężenia, a krzywe szkieletowe nie są

zależnościami materiałowymi, lecz pewnymi konstrukcjami geometrycznymi. Podobną analogię zastosowano w pracach [20, 21] do opisu teoretycznego zachowania się materiału przy złożonych, nieproporcjonalnych obciążeniach cyklicznych z wykorzystaniem wielopowierzchniowych modeli teorii plastyczności Mroza [22].

2. Procedura doświadczalna

2.1 Badany materiał i próbka

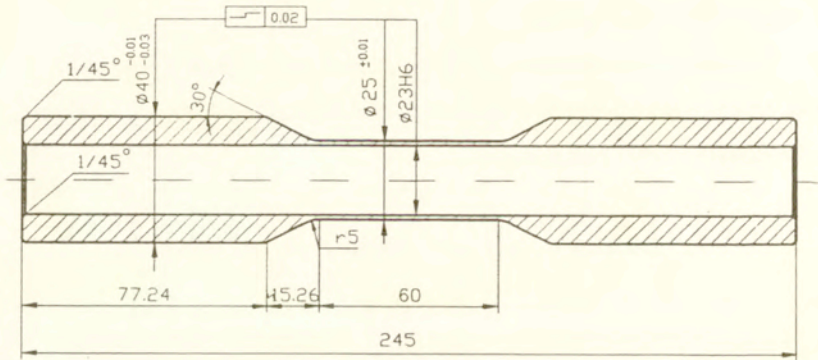
Badania przeprowadzono dla stopu aluminium PA6 w stanie dostawy, której skład chemiczny zamieszczono w tabeli 1. Jest to stop konstrukcyjny stosowany w przemyśle lotniczym i maszynowym.

TABELA 1. Skład chemiczny stopu aluminium PA6

materiał ¹ skład stopowy	Cu	Mg	Mn
	[%]	[%]	[%]
PA6	3,8 - 4,8	0,4 - 1,1	0,4 - 1

Doświadczenia przeprowadzono na cienkościennych próbkach rurkowych wytoczonych z pełnego pręta o średnicy 45 mm. Kształt i wymiary próbek pokazano na rys.2. Próbki przystosowane były do mocowania w hydraulicznych uchwytych dwuosiowej maszyny wytrzymałościowej *INSTRON 1343*. Po obu stronach w otwór wewnętrzny wkładano dopasowane sworznie zapobiegające przed zmniejszeniem średnicy wewnętrznego otworu pod wpływem promieniowego obciążenia w tulei zaciskowej. Długość części pomiarowej próbki jest ograniczona możliwościami wykonania otworu wewnętrznego i została tak dobrana, aby zminimalizować nierównomierność rozkładu odkształceń po długości próbki w trakcie jej obciążania, a z drugiej strony aby ograniczyć możliwość utraty stateczności próbki zarówno przy cyklach rozciąganie - ściskanie jak i przy cyklach dwukierunkowego skręcania.

Stosunek długości pomiarowej do średnicy wewnętrznego otworu próbki wynosił 2,6 i w żadnym przypadku realizowanego stanu naprężenia nie wystąpiło wyboczenie próbki w rozpatrywanym zakresie obciążeń. Występowało jednak zaburzenie jednorodności stanu odkształcenia na długości pomiarowej wywoływane w części przez uchwyty zaciskowe, co zostało szczegółowo opisane w pracy [23].

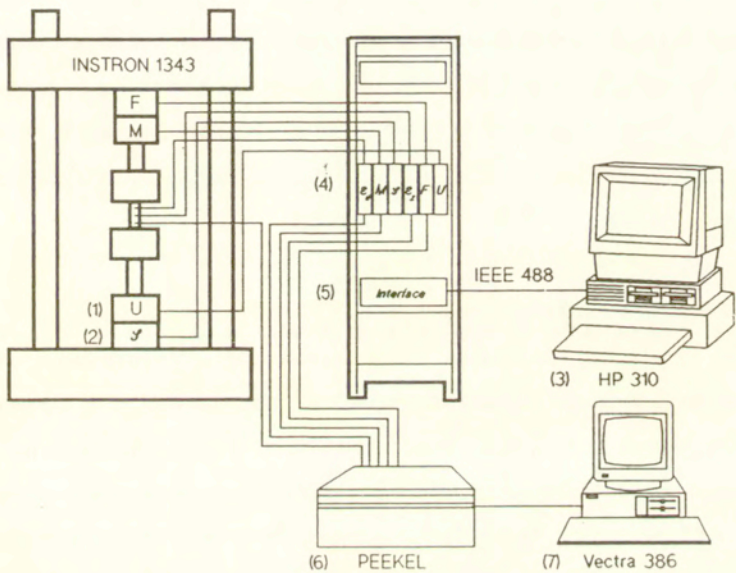


Rys.2 Kształt i wymiary próbki stosowanej do badań w złożonym stanie naprężenia.

2.2 Stanowisko badawcze

Badania wykonywano na maszynie wytrzymałościowej *Instron 1343* umożliwiającej realizację złożonych stanów naprężenia poprzez różne kombinacje siły osiowej i momentu skręcającego. Pełny schemat stanowiska badawczego stosowanego do realizacji programu obciążeń cyklicznych oraz do określania powierzchni plastyczności ilustruje rys. 3. W układzie obciążającym maszyny wytrzymałościowej *Instron* znajdują się dwa niezależnie działające siłowniki hydrauliczne, jeden przeznaczony do ściskania względnie rozciągania próbek, drugi

natomiast do ich dwukierunkowego skręcania, które sterowane są w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego kontrolowanego przez komputer Hewlett-Packard serii 310.



Rys.3 Schemat stanowiska badawczego.

Do wspomnianego komputera doprowadzone jest, za pośrednictwem analogowych układów przetwarzających oraz przetwornika analogowo-cyfrowego, sześć sygnałów pomiarowych: przemieszczenie osiowe tłoka maszyny, obrót uchwytu mocującego próbkę, siła osiowa, moment skręcający, odkształcenie osiowe oraz odkształcenie postaciowe. Opracowane oprogramowanie dało możliwość obciążania próbek z

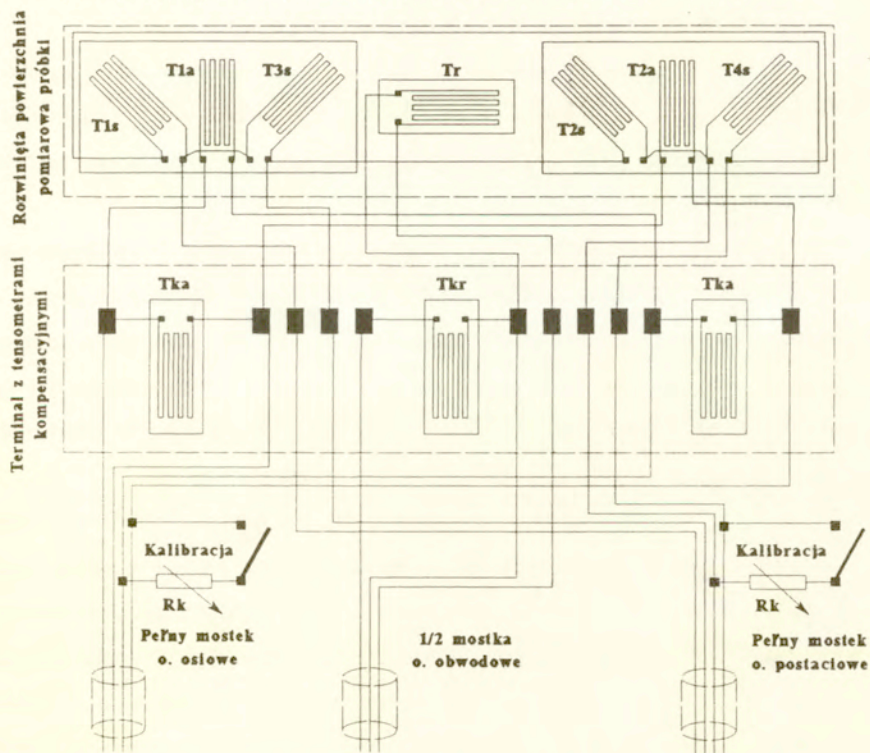
zadaną prędkością dla każdej składowej odkształcenia z zachowaniem ich stałego stosunku aż do chwili osiągnięcia wymaganej wartości intensywności odkształcenia plastycznego. Opisywane stanowisko badawcze wyposażone zostało w dwa niezależne układy akwizycji danych pomiarowych. Pierwszy z nich związany jest z komputerem sterującym i z tego powodu ma ograniczone możliwości przedstawiania aktualnego stanu wykonania eksperymentu. Drugi natomiast układ pracuje niezależnie od komputera sterującego, a jego integralną częścią jest wielokanałowy system pomiarowy firmy PEEKEL, który dzięki sprzęgnięciu z komputerem firmy Hewlett-Packard typu Vectra 386 zapewniał możliwość bieżącego obserwowania wyników pomiarowych oraz ich rejestrację dla wszystkich wykorzystywanych kanałów w przeprowadzanym aktualnie eksperymencie.

2.4 Pomiar odkształceń i obciążeń

Pomiarów odkształceń w badaniach przy monotonicznym obciążaniu, wykonywanych dla określenia powierzchni plastyczności i w badaniach przy obciążeniach cyklicznych, przeprowadzanych w celu wyznaczenia krzywych szkieletowych, dokonywano za pomocą układów tensometrycznych naklejanych na powierzchni próbek. Odkształcenia osiowe mierzono przy pomocy pełnomostkowego układu czterech tensometrów, z których dwa naklejone po przeciwnych stronach próbki były tensometrami czynnymi, natomiast dwa pozostałe stanowiły układ kompensujący zmiany temperatury i naklejone były na specjalnie zaprojektowanej tulei dołączanej do próbki. Układ przeznaczony do pomiaru odkształceń postaciowych był również pełnomostkowy z czterema tensometrami czynnymi naklejonymi pod kątami 45° do osi próbki. Ponadto rejestrowano również sygnały odkształceń obwodowych próbki za pomocą dodatkowego układu dwóch tensometrów połączonych półmostkowo. Jeden z nich naklejony był w kierunku obwodowym w środkowej części pomiarowej próbki, natomiast drugi na wspomnianej już tulei nakładanej na część chwytową próbki. Schematy wykorzystywanych układów tensometrycznych pokazane są na rys.4. Układy do pomiaru odkształceń

osiowych i postaciowych podłączone były do systemu pomiarowego maszyny *Instron 1343*, natomiast układ tensometryczny do pomiaru odkształceń obwodowych podłączony był bezpośrednio do systemu pomiarowego firmy *PEEKEL*. Zawsze przed przystąpieniem do badań wspomniane układy tensometryczne podlegały kalibracji przy pomocy precyzyjnego mostka tensometrycznego typu *UGR 60* firmy *Hottinger* tak, aby maksymalnemu sygnałowi sterowania o wartości $10V$ odpowiadało odkształcenie $0,8\%$. Rozdzielczość pomiaru odkształceń osiowych, postaciowych i obwodowych wynosiła 8×10^{-6} .

Pomiarów obciążeń próbki dokonywano przy pomocy dynamometrów tensometrycznych o nominalnej nośności $100kN$ dla siły osiowej oraz $1000Nm$ dla momentu skręcającego, co zapewniało odpowiednio rozdzielczości $100N$ i $1Nm$.



Rys.4 Schemat tensometrycznych układów do pomiaru składowych odkształceń.

2.5 Opis programu badań

Program doświadczeń obejmował trzy etapy:

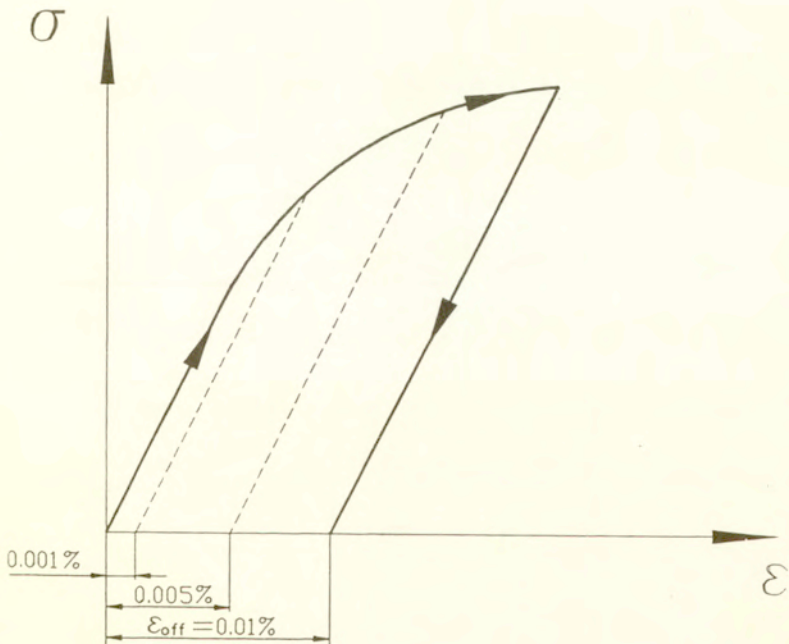
1. Wyznaczanie początkowej powierzchni plastyczności przy monotonicznym obciążaniu wielu próbek, przy różnych stanach naprężenia tak, aby równomiernie pokryć obszar wszystkich czterech ćwiartek płaszczyzny ($\sigma_{zz}, \tau_{z\theta}$).
2. Realizację programu obciążeń cyklicznych, przy różnych stanach naprężenia, zawierającego określoną liczbę cykli o stałej amplitudzie odkształceń całkowitych oraz określoną liczbę cykli o malejącej stopniowo w każdym cyklu amplitudzie odkształceń całkowitych w celu wyznaczenia krzywej cyklicznej.
3. Wyznaczanie wtórnej powierzchni plastyczności na podstawie ponownego monotonicznego obciążania próbek w tych samych stanach naprężeń w jakich realizowano program obciążeń cyklicznych w etapie drugim.

Początkową powierzchnię plastyczności wyznaczono na podstawie wyników proporcjonalnego obciążania szesnastu jednakowych próbek w różnych stanach naprężenia tak, aby uzyskać równomiernie rozłożone punkty doświadczalne na całej płaszczyźnie naprężeń ($\sigma_{zz}, \tau_{z\theta}$).

Istotną sprawą związaną z wyznaczeniem punktów powierzchni plastyczności jest definicja umownej granicy plastyczności materiału, ponieważ może decydować o kształcie i wymiarach powierzchni [24, 25, 26, 27]. W pracy jako granicę plastyczności badanego stopu aluminium, cechującego się gładkim przejściem od zakresu sprężystego do zakresu plastycznego, przyjmowano wartość naprężenia odpowiadającego określonej wartości odkształcenia plastycznego.

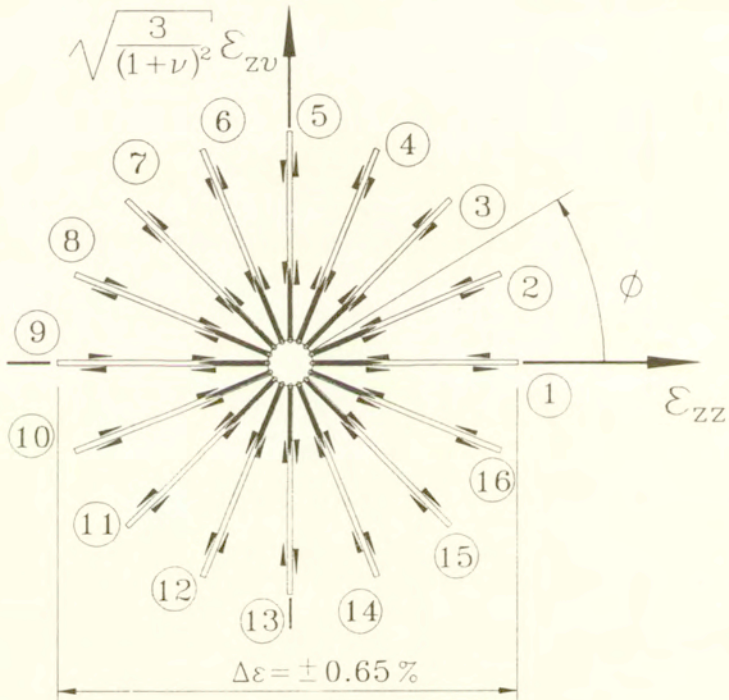
Procedura wyznaczania punktu powierzchni plastyczności na danej próbce realizowana była za pomocą programu komputerowego napisanego w języku Basic 4, który zapewniał współpracę z interfejsem maszyny wytrzymałościowej *Instron*. Zgodnie z tym programem w początkowej fazie obciążania próbki obliczany był moduł sprężystości. Obliczenia te przeprowadzano na podstawie punktów doświadczalnych zebranych w ustalonym wcześniej przedziale wartości naprężeń. Proces obciążania próbki był zatrzymywany w chwili gdy różnica intensywności

odkształceń całkowitych i intensywności odkształceń sprężystych, obliczonych jako iloraz intensywności naprężeń i wyznaczonego wcześniej modułu Younga, przekraczała zadaną wartość (wartość ta wynosiła 0.01%). Po spełnieniu tego warunku następowała zmiana sposobu sterowania maszyną z odkształceń na sterowanie obciążeniami i następował proces odciążania do zerowej wartości siły i momentu skręcającego. Schematyczną ilustrację procesu obciążania próbki do zadanej wartości intensywności odkształcenia, a następnie procesu odciążania przedstawiono na rys.5. Na rysunku tym liniami przerywanymi zaznaczono umowne granice plastyczności odpowiadające efektywnym odkształceniom plastycznym o wartości 0,001% i 0,005%.



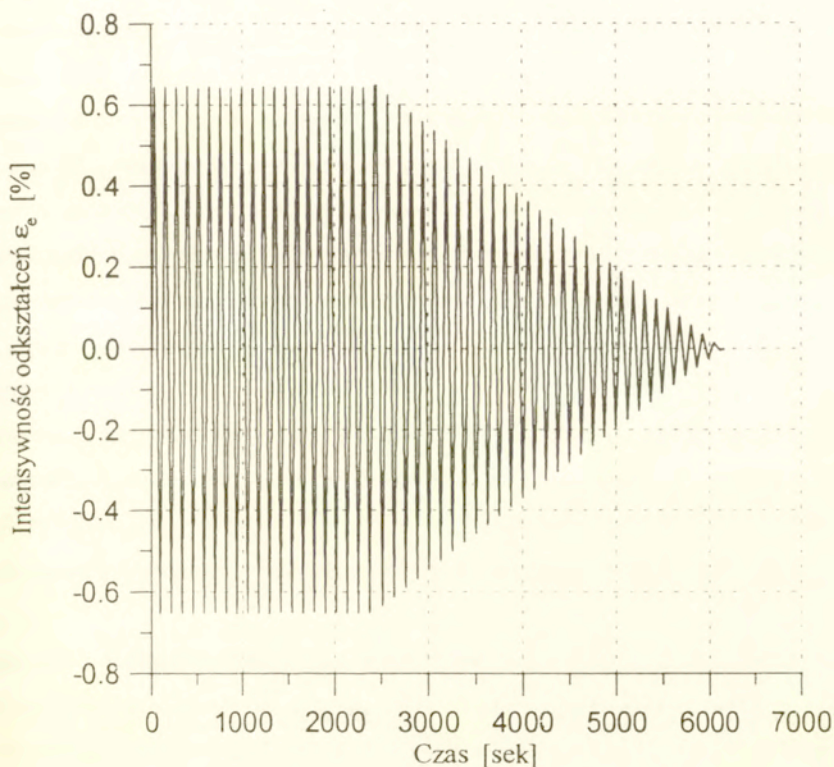
Rys.5 Schemat monotonicznego obciążania próbki i wyznaczenia umownych granic plastyczności.

Drugim etapem programu doświadczeń było obciążanie cykliczne wzdłuż różnych dróg proporcjonalnych w płaszczyźnie $(\sigma_{zz}, \tau_{z\theta})$, zgodnie ze schematem zamieszczonym na rys.6. Cyfry w kółkach oznaczają numery próbek, a schemat obciążeń dla np. próbki pierwszej oznacza, że obciążanie cykliczne zaczynało się od rozciągania, a następnie realizowano cykle rozciągania - ściskania o amplitudzie odkształceń całkowitych 0,65%. Dla próbki dziewiątej cyklowanie rozpoczynało się od ściskania. Tak więc program obciążeń cyklicznych dla symetrycznie położonych numerów próbek różnił się kierunkiem rozpoczęcia i przy zachowaniu stałej liczby ćwiartek cykli obciążania różnił się kierunkiem zakończenia.



Rys.6 Schemat stanów naprężenia realizowanych w programie obciążeń cyklicznych.

Program obciążeń cyklicznych w danym kierunku proporcjonalnego obciążenia przedstawiono na rys. 7. Składał się on z dwóch części. W pierwszej z nich realizowano założoną liczbę cykli o stałej amplitudzie intensywności odkształceń całkowitych równych $\Delta\varepsilon = \pm 0.65\%$, przy prędkości odkształcenia $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^{-4}$ 1/s. W drugiej części realizowano stałą liczbę cykli o malejącej, w każdym cyklu, amplitudzie odkształceń od wartości $\Delta\varepsilon = \pm 0.65\%$ do wartości zerowej. Prędkość odkształceń malała w każdym cyklu ze względu na obniżanie wartości amplitudy przy jednoczesnym utrzymywaniu tego samego czasu wykonania cyklu obciążania.



Rys.7 Program obciążeń cyklicznych o stałej i malejącej amplitudzie realizowany dla każdego z szesnastu kierunków obciążania.

Program cykli stałych zawierał 81 ćwiartek (20 cykli pełnych plus pierwsza ćwiartka dojścia od zera do wartości amplitudy odkształceń całkowitych). Założono, że jest to liczba wystarczająca do uzyskania cyklu ustalonego, tj. zamkniętego przebiegu zmian stanu naprężenia nie wykazującego przyrostów względnie spadków naprężenia w całym cyklu, w stosunku do pętli cykli poprzedzających. Program cykli malejących zawierał 30 cykli i realizowany był natychmiast po zakończeniu cykli stałych. Celem tego etapu było uzyskanie krzywej szkieletowej dla badanego materiału.

Do wyznaczenia krzywej szkieletowej zastosowano w pracy opisany na wstępie sposób dekrementalny realizowany na jednej próbce, który polega na wcześniejszym osiągnięciu cyklu ustalonego przy wybranej stałej amplitudzie odkształceń całkowitych, a następnie wykonuje się cykle z malejącą liniowo do zera amplitudą odkształceń całkowitych. W części przyrostowo malejącej wykonywano 30 cykli i zapewniało to wystarczającą dokładność dla wyznaczenia krzywej cyklicznej. W tym przypadku krzywa szkieletowa stanowi zbiór punktów uzyskanych z odczytania wartości intensywności naprężenia i intensywności odkształcenia, odpowiadających ich wartościom ekstremalnym (zwrotnym) w danym cyklu, a zatem uzyskiwana była z 30 punktów. Zaletą tego sposobu jest wyeliminowanie problemu różnic materiałowych wynikających z badania wielu próbek wykonywanych z różnych odcinków prętów względnie rur. W opisywanym programie badań określono krzywe szkieletowe dla szesnastu wybranych kierunków w płaszczyźnie $(\sigma_{zz}, \tau_{z\theta})$, (rys. 6), co dało możliwość wyznaczenia na ich podstawie cyklicznych powierzchni plastyczności.

Trzeci etap programu doświadczalnego miał na celu wyznaczenie umownej granicy plastyczności bezpośrednio po zakończeniu programu obciążeń cyklicznych zgodnie z procedurą stosowaną przy wyznaczaniu początkowej powierzchni plastyczności. Zbiór punktów doświadczalnych otrzymanych przy monotonicznym obciążeniu w kierunku zgodnym z kierunkiem wcześniejszych obciążeń cyklicznych wykorzystano do wyznaczenia powierzchni plastyczności dla materiału

hipotetycznego, wzmocnionego na skutek cyklicznego obciążania, przy czym każda z próbek była obciążana w innym kierunku. Powierzchnia ta obrazuje graniczną ewolucję właściwości mechanicznych materiału, reprezentowanych przez powierzchnie plastyczności dla materiału cyklicznie zdeformowanego w różnych kierunkach rozpatrywanej przestrzeni naprężeń. Przyjęta procedura polegała na wyznaczeniu 16 punktów leżących na proporcjonalnych drogach obciążania równomiernie rozmieszczonych we wszystkich czterech ćwiartkach płaszczyzny ($\sigma_{zz}, \tau_{z\theta}$). Testy realizowano przy sterowaniu odkształceniem w czasie obciążania i przy sterowaniu obciążeniem w czasie procesu odciążania. Sposób wyznaczania umownej granicy plastyczności dla danego kierunku obciążenia był taki sam jak schematycznie pokazano na rys.5 (jedyną różnicą była wartość granicy plastyczności, przy której zatrzymywano obciążanie próbki, wynoszące w tym przypadku 0.005%), natomiast kolejne kierunki obciążania w przestrzeni naprężeń pokrywały się z kierunkami cyklicznego obciążania, jak pokazano na rys.6. Numery od 1 do 16 odpowiadają kolejnym próbkom obciążanym monotonicznie do wartości intensywności odkształcenia trwałego 0.005%.

2.6 Stan naprężenia i odkształcenia w części pomiarowej próbki

Naprężenie osiowe obliczano na podstawie następującego wzoru

$$\sigma_{zz} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot (D_0^2 - d_0^2)}, \quad (1)$$

gdzie:

F - siła osiowa,

D_0 - początkowa średnica zewnętrzna próbki na bazie pomiarowej,

d_0 - początkowa średnica wewnętrzna na bazie pomiarowej próbki,

natomiast naprężenie styczne, odniesione do średnicy zewnętrznej, określone jest następującym związkiem

$$\tau_{z\theta} = \frac{16 \cdot M_s \cdot D_0}{\pi \cdot (D_0^4 - d_0^4)}, \quad (2)$$

gdzie

M_s - moment skręcający próbkę.

Wartość intensywności naprężenia w programie sterującym pracą maszyny wytrzymałościowej i w pierwszym przybliżeniu procedury wyznaczania liczbowych współczynników warunku plastyczności wyrażono zależnością

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

natomiast wartości intensywności odkształcenia zdefiniowano związkiem uwzględniającym współczynnik Poissona ν

$$\varepsilon_e = \sqrt{\varepsilon_{zz}^2 + \frac{3}{(1+\nu)^2} \cdot \varepsilon_{z\theta}^2}, \quad (4)$$

gdzie: ε_{zz} - odkształcenie osiowe

$$\varepsilon_{z\theta} = \frac{\gamma_{z\theta}}{2} - \text{odkształcenie postaciowe.}$$

Wartość współczynnika Poissona, wyznaczoną na podstawie wyników wstępnych badań, wprowadzano przed uruchomieniem programu sterującego pracą maszyny wytrzymałościowej.

2.7 Postać warunku plastyczności

W pracy do aproksymacji rezultatów doświadczalnych przyjęto anizotropowy warunek plastyczności, którego ogólna postać podana została przez Misesa [28], a w formie uwzględniającej człony liniowe przez Szczepińskiego [29]. Warunek przedstawiony w pracy [29] dla przypadku płaskiego stanu naprężenia

realizowanego w prezentowanych badaniach, tj. gdy tylko $\sigma_{zz} \neq 0$ i $\tau_{z\theta} \neq 0$, upraszcza się do postaci:

$$F(\sigma_{ij}) = (k_{23} + k_{31})\sigma_{zz}^2 - 2k_{35}\sigma_{zz}\tau_{z\theta} + k_{55}\tau_{z\theta}^2 + (h_{23} - h_{31})\sigma_{zz} + h_{55}\tau_{z\theta} = 1. \quad (5)$$

Współczynniki k_{ij} oraz h_{ij} występujące w tym związku można wyrazić poprzez wielkości fizyczne w następujący sposób:

$$\begin{aligned} k_{23} + k_{31} &= \frac{1}{Y_z Z_z}, & h_{23} - h_{31} &= \frac{1}{Y_z} - \frac{1}{Z_z}, \\ k_{55} &= \frac{1}{R_{z\theta} P_{z\theta}}, & h_{55} &= \frac{1}{R_{z\theta}} - \frac{1}{P_{z\theta}}, \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie Y_z - granica plastyczności przy rozciąganiu, Z_z - bezwzględna wartość granicy plastyczności przy ściskaniu, $R_{z\theta}$ - granica plastyczności przy ścinaniu uzyskana dla dodatnich naprężeń $\tau_{z\theta}$, $P_{z\theta}$ - bezwzględna wartość granicy plastyczności przy ścinaniu uzyskana dla ujemnych naprężeń $\tau_{z\theta}$. Jedyne współczynnik k_{35} nie daje się wyznaczyć z prostych prób rozciągania, ściskania lub skręcania. Aby uzyskać pełną formę tego równania z wartościami liczbowymi wszystkich współczynników anizotropii należy przeprowadzić aproksymację punktów doświadczalnych, z których co najmniej jeden musi pochodzić z próby wykonanej w złożonym stanie naprężenia. Po uwzględnieniu tych współczynników równanie (5) przyjmuje postać

$$F(\sigma_{ij}) = \frac{1}{Y_z Z_z} \sigma_{zz}^2 - 2k_{35} \sigma_{zz} \tau_{z\theta} + \frac{1}{R_{z\theta} P_{z\theta}} \tau_{z\theta}^2 + \left(\frac{1}{Y_z} - \frac{1}{Z_z} \right) \sigma_{zz} + \left(\frac{1}{R_{z\theta}} - \frac{1}{P_{z\theta}} \right) \tau_{z\theta} = 1 \quad (7)$$

W pracy do aproksymacji punktów doświadczalnych odpowiadających przyjętej definicji granicy plastyczności wykorzystywano to równanie w nieco wygodniejszej następującej formie:

$$F(\sigma_{ij}) = A\sigma_{zz}^2 + 2B\sigma_{zz}\tau_{z\vartheta} + C\tau_{z\vartheta}^2 + 2D\sigma_{zz} + 2E\tau_{z\vartheta} = 1, \quad (8)$$

Procedura obliczeń polegała na wyznaczeniu współczynników anizotropii dla punktów doświadczalnych reprezentujących daną granicę plastyczności tak, aby suma kwadratów odległości punktów eksperymentalnych od krzywej aproksymacji (8) osiągała minimum. Przyjęty warunek plastyczności umożliwiał określenie zmian wymiarów osi elipsy reprezentującej powierzchnię plastyczności, położenia jej środka, obrotu względem przyjętego układu współrzędnych, a także dał możliwość opisanie efektu Bauschingera. Zależności wiążące współczynniki anizotropii A, B, C, D, E w warunku plastyczności (8) z wymiarami elipsy przedstawione zostały w pracy [23].

3. Wyniki badań

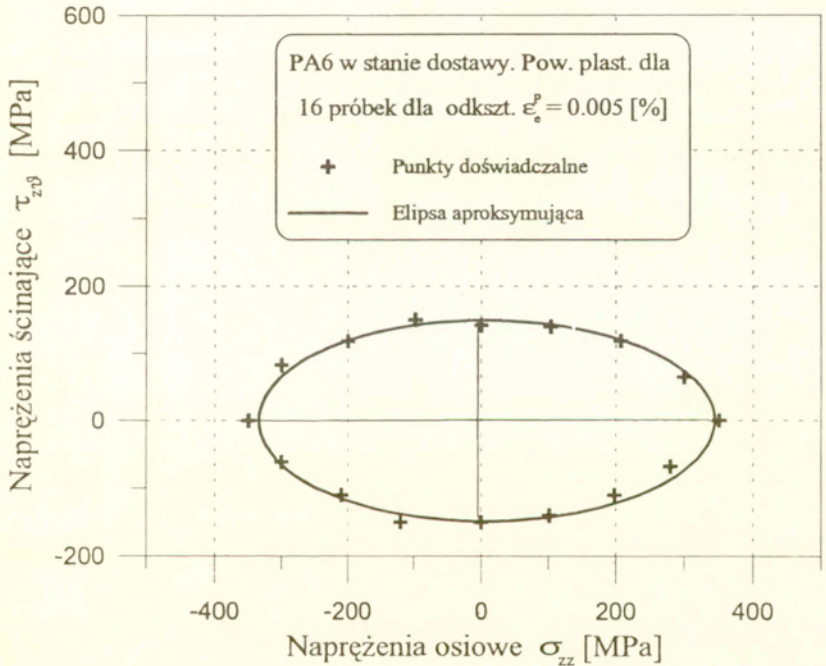
3.1 Początkowa powierzchnia plastyczności dla materiału w stanie dostawy

Początkową powierzchnię plastyczności wyznaczono na podstawie monotonicznego obciążania szesnastu próbek wzdłuż szesnastu różnych dróg proporcjonalnych w dwuwymiarowej przestrzeni naprężeń ($\sigma_{zz}, \tau_{z\vartheta}$) do wartości intensywności odkształceń plastycznych równych 0.01%. W rezultacie otrzymano, dla każdego rozpatrywanego kierunku, wykresy intensywności naprężeń jako funkcji intensywności odkształceń całkowitych. Po uwzględnieniu nieliniowych odkształceń sprężystych, wynikających z nieliniowości geometrycznych procesu obciążania próbki związanych z układem próbka - uchwyty maszyny opisanymi szczegółowo w pracy [23], uzyskano odseparowanie odkształceń sprężystych od plastycznych i w efekcie przebiegi intensywności naprężeń jako funkcji intensywności odkształceń

plastycznych. Tak uzyskane wykresy aproksymowano krzywymi wykładniczymi postaci

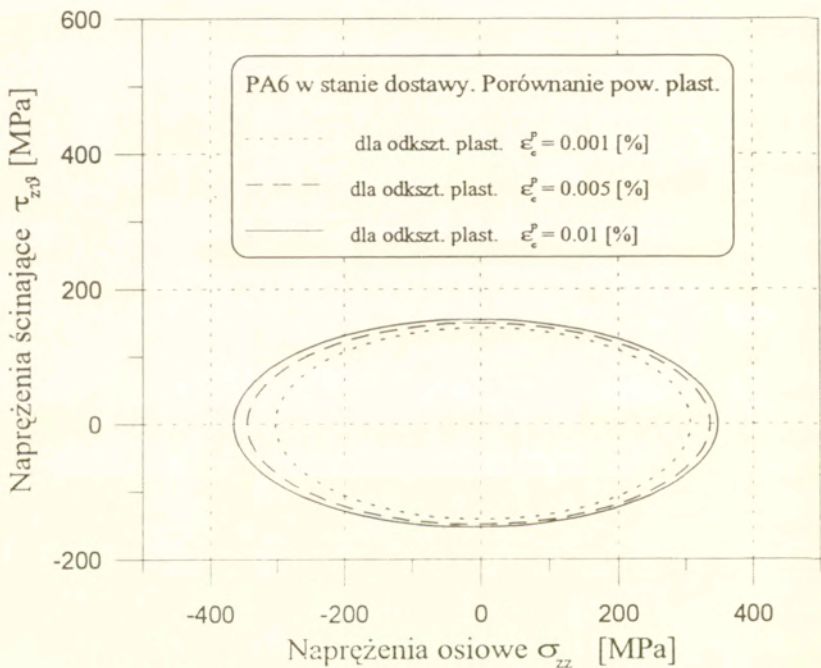
$$\sigma_e = C \cdot (\varepsilon_e^{(p)})^n, \quad (9)$$

gdzie C , n - stałe. Na podstawie krzywych odpowiadających różnym proporcjonalnym drogom obciążania określano punkty powierzchni plastyczności dla danej definicji granicy plastyczności (przy danej granicy dla jednej krzywej uzyskiwano jeden punkt powierzchni).



Rys.8 Punkty doświadczalne i ich aproksymacja obrazująca powierzchnię plastyczności dla wybranej definicji granicy plastyczności wyznaczoną na szesnastu próbkach w stanie dostawy.

W ten sposób otrzymane punkty przybliżano równaniem elipsy reprezentującym warunek plastyczności w postaci (8) tak, aby suma kwadratów odległości punktów doświadczalnych od krzywej aproksymacji osiągała minimum. Na rys. 8 przedstawiono tak uzyskane punkty doświadczalne powierzchni plastyczności dla umownej granicy plastyczności odpowiadającej odkształceniom plastycznym równym 5×10^{-5} . Linia ciągłą zaznaczono aproksymację punktów doświadczalnych i położenie głównych osi elipsy określonej zgodnie z opisaną wyżej procedurą.



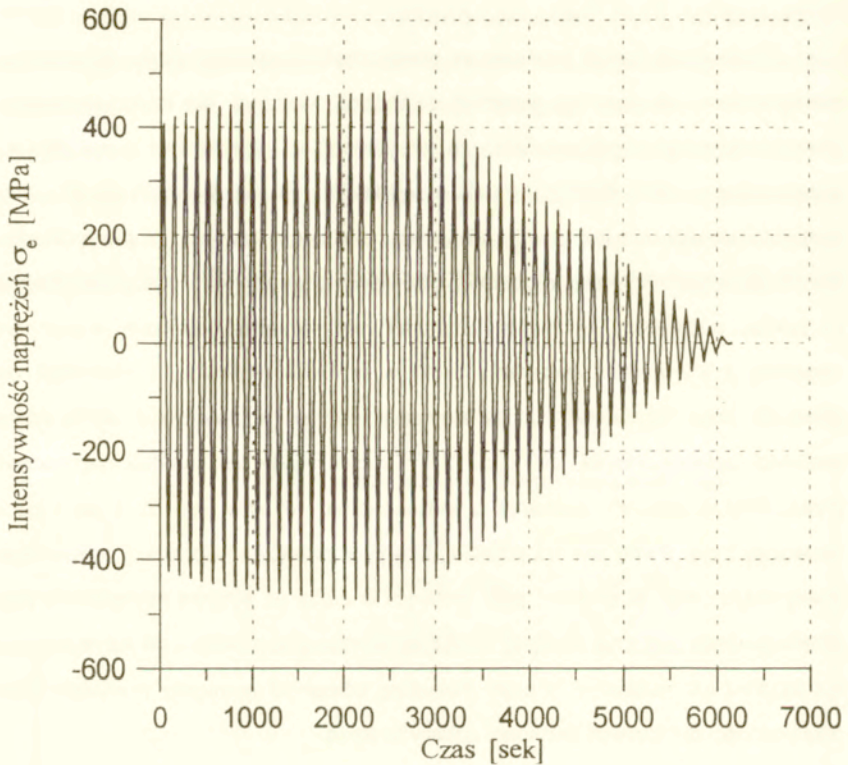
Rys.9 Aproksymacje obrazujące powierzchnie plastyczności wyznaczone na szesnastu próbkach w stanie dostawy, dla trzech wartości umownych granic plastyczności.

Zestawienie trzech powierzchni plastyczności badanego stopu aluminium w stanie dostawy, a więc bez wstępnej deformacji cyklicznej, dla trzech umownych granic plastyczności odpowiadających odkształceniom plastycznym o wartościach odpowiednio 0,001%; 0,005% i 0,01% przedstawiono na rys. 9 w celu zilustrowania wpływu wielkości uplastycznienia na kształt i położenie powierzchni plastyczności. Wyniki dla materiału w stanie dostawy omówiono szczegółowo w pracy [23]. Należy tu jednak podkreślić, że badany materiał ma wyraźnie określoną anizotropię związaną z kierunkiem wyciskania pręta w procesie wytwórczym. Stosunek osi głównych elips uzyskanych z aproksymacji wynosi, w zależności od przyjętej wielkości uplastycznienia, od 2 do 2,3. Środek elipsy jest bardzo nieznacznie przesunięty w kierunku ściskania o wartość około 10 MPa (rys. 8), a jak można zauważyć z rys. 9 inny jest też przebieg krzywych naprężeń jako funkcji odkształceń plastycznych przy skręcaniu i przy osiowym obciążaniu. Krzywe materiałowe przy skręcaniu mają znacznie mniejszy moduł wzmocnienia w stosunku do krzywych przy rozciąganiu lub ściskaniu, o czym świadczą odległości pomiędzy powierzchniami plastyczności dla różnych wielkości uplastycznienia.

3.2 Wyniki uzyskane dla materiału po cyklicznych obciążeniach

3.2.1 Krzywe szkieletowe

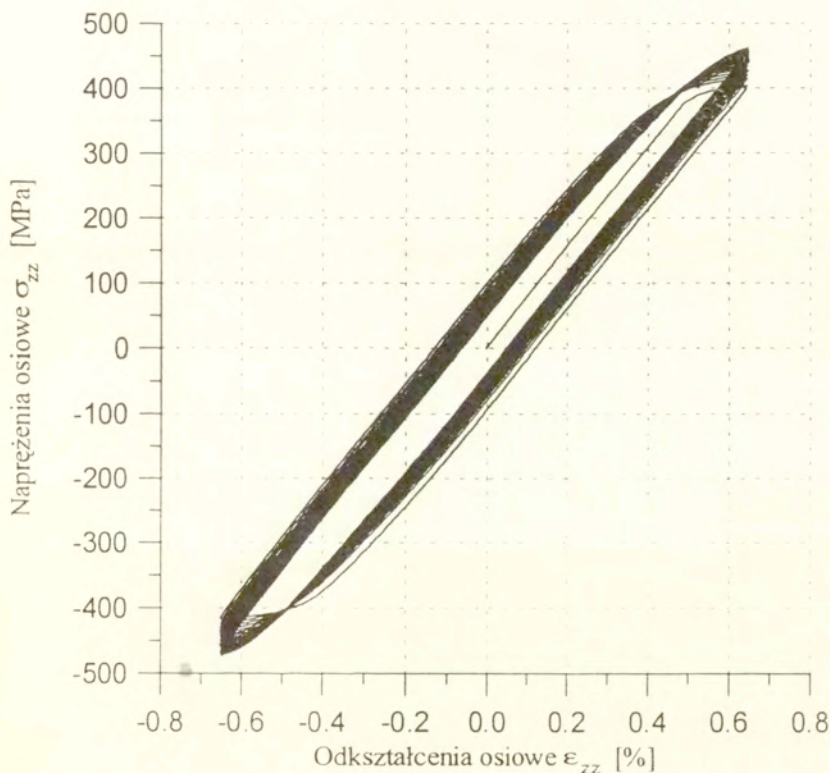
Deformacja cykliczna przeprowadzana była najpierw, jak już wcześniej podano, przy stałej amplitudzie intensywności odkształceń całkowitych $\Delta\varepsilon = \pm 0.65\%$, a następnie realizowano program, w którym po każdym cyklu obniżano amplitudę odkształceń o określoną wartość aż do poziomu zerowego. Przykładowy przebieg zadawanych cykli odkształceń całkowitych dla dwóch etapów, odpowiednio o stałej i malejącej amplitudzie, przedstawiono na rys.7. Odpowiedź materiału w naprężeniach dla wymuszenia z rys.7, w przypadku rozciągania-ściskania, jest zilustrowana na rys. 10.



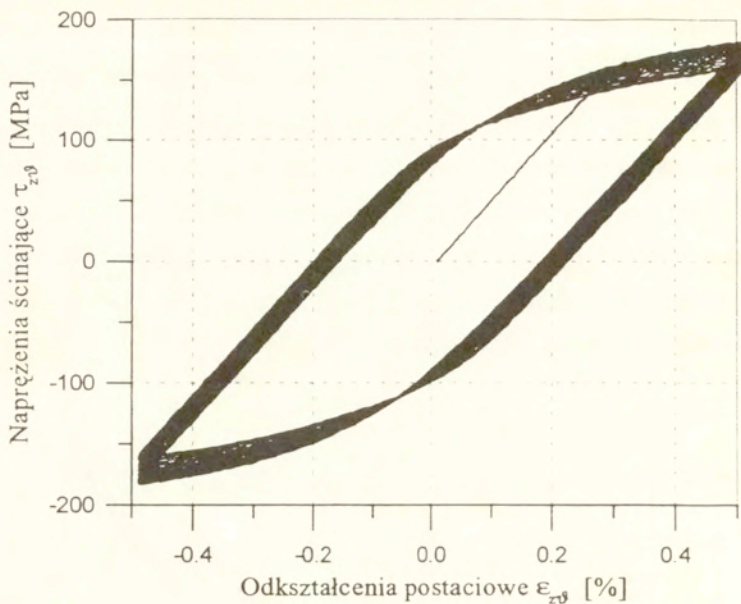
Rys.10 Odpowiedź materialu, w naprężeniach jako funkcji czasu, na sterowany w odkształceniach program obciążeń cyklicznych o stałej i malejącej amplitudzie pokazany na rys.7.

Przykładowe rezultaty zilustrowano na rys. 11 dla przypadku rozciągania-ściskania i na rys. 12 dla cyklu dwukierunkowego skręcania. Obrazują one zmianę składowej naprężenia jako funkcji składowej całkowitego odkształcenia dla pierwszej części obciążenia cyklicznego o stałej amplitudzie odkształceń. Zmiany odkształceń plastycznych odpowiadające kolejnym cyklom z rys. 12 pokazano na rys. 13. W kolejnych cyklach uzyskuje się wprawdzie stopniowe zmniejszanie się różnic wartości odkształceń plastycznych (zilustrowanych na rys. 14 dla przypadku

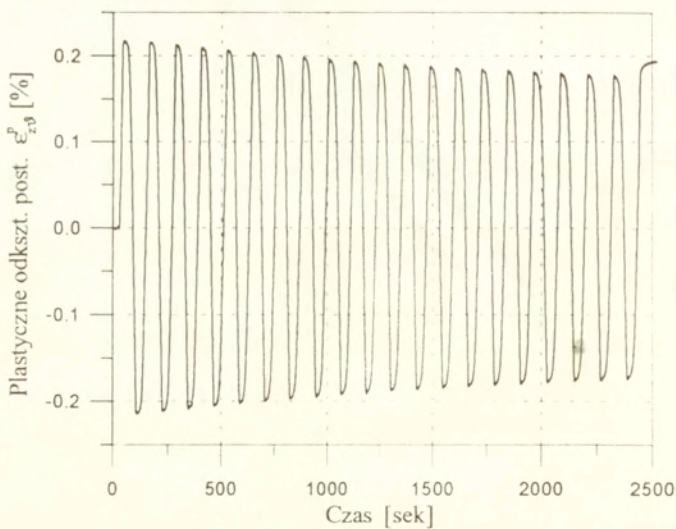
dwukierunkowego skręcania) jak również stopniowe zmniejszanie się przyrostów amplitudy naprężenia w kolejnych cyklach (jak to zilustrowano na rys. 15 dla tego samego przypadku obciążenia), ale nie uzyskuje się jeszcze ustalonej pętli histerezy. Tym niemniej różnice przebiegów dalszych cykli są już znacznie zmniejszone i można przypuszczać, na podstawie serii wyników omówionych powyżej, że przebieg ostatniego cyklu o stałej amplitudzie odkształceń jest już bardzo zbliżony do przebiegu ustalonego.



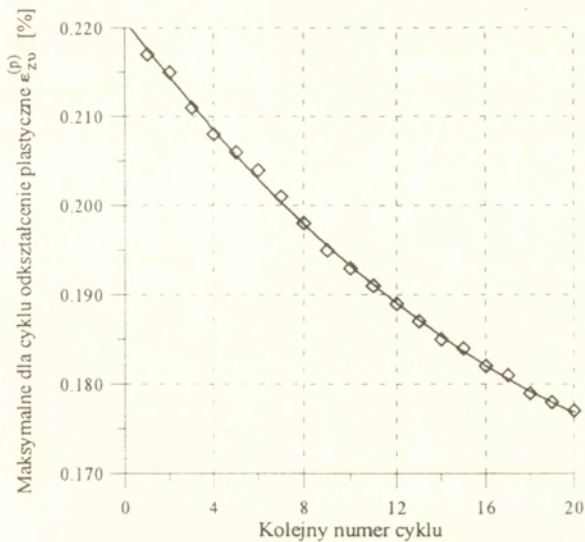
Rys.11 Przykładowy przebieg całego programu obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie dla cykli rozciąganie-ściskanie w postaci wykresu naprężenia jako funkcji odkształcenia całkowitego.



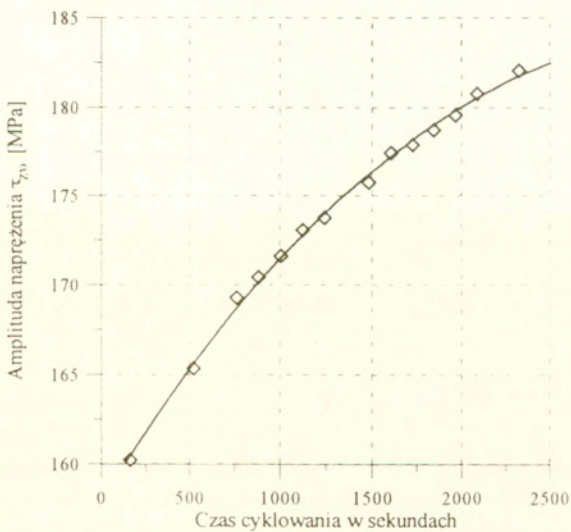
Rys.12 Przykładowy przebieg całego programu obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie dla cykli dwukierunkowego skręcania w postaci wykresu naprężenia jako funkcji odkształcenia całkowitego.



Rys.13 Przebieg zmian plastycznej części składowej odkształcenia w kolejnych cyklach obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie dla cykli dwukierunkowego skręcania.

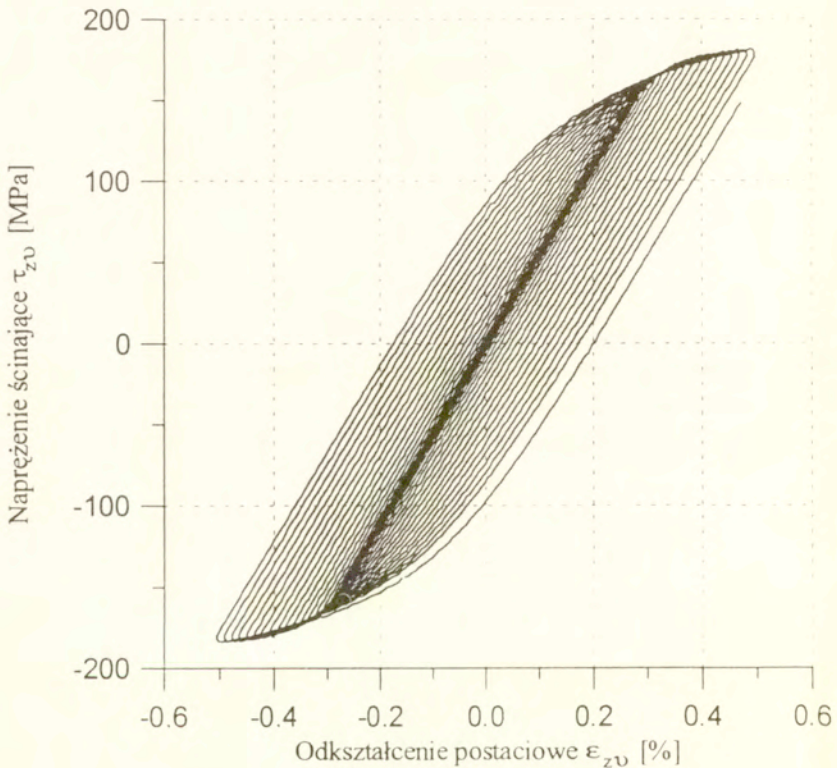


Rys.14 Zmiany plastycznej części składowej odkształcenia w kolejnych cyklach obciążeń o stałej amplitudzie odkształceń całkowitych dla dwukierunkowego skręcania.

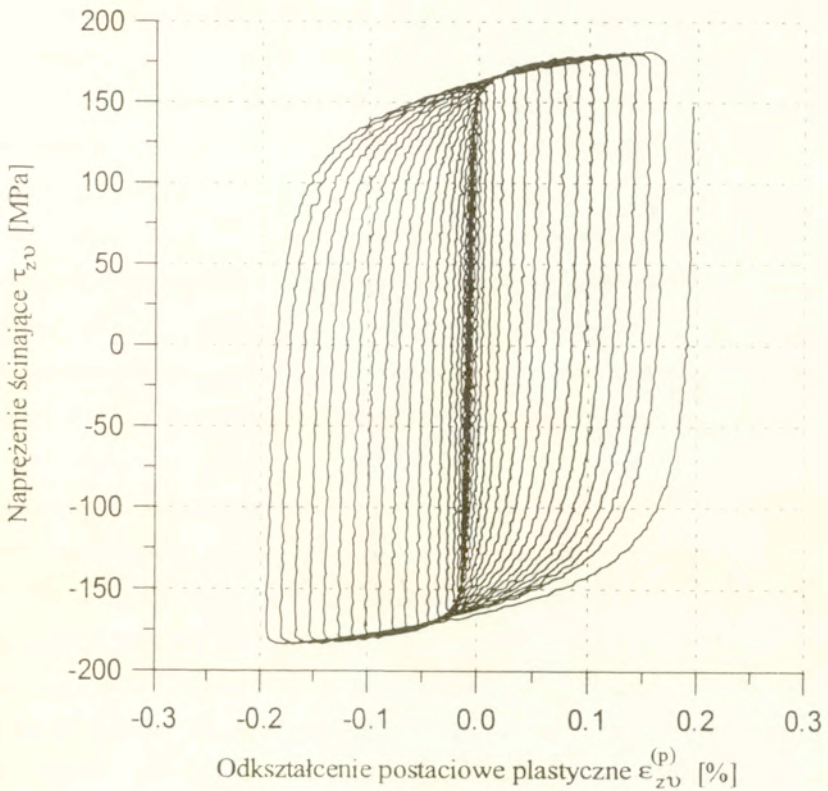


Rys.15 Przebieg zmian amplitudy naprężenia w cyklach obciążeń o stałej amplitudzie odkształceń całkowitych dla dwukierunkowego skręcania.

Przykładowe rezultaty dla drugiej części obciążeń cyklicznych o malejącej amplitudzie, dla dwukierunkowego skręcania, w postaci wykresów odpowiednich składowych naprężeń jako funkcji odkształceń całkowitych przedstawiono na rys. 16.



Rys.16 Przykładowy przebieg programu obciążeń cyklicznych o malejącej amplitudzie dla dwukierunkowego skręcania w postaci wykresu zmian naprężenia w funkcji odkształcenia całkowitego. Widoczna krzywa szkieletowa, będąca obrazem punktów zwrotnych kolejnych pętli histerezy.

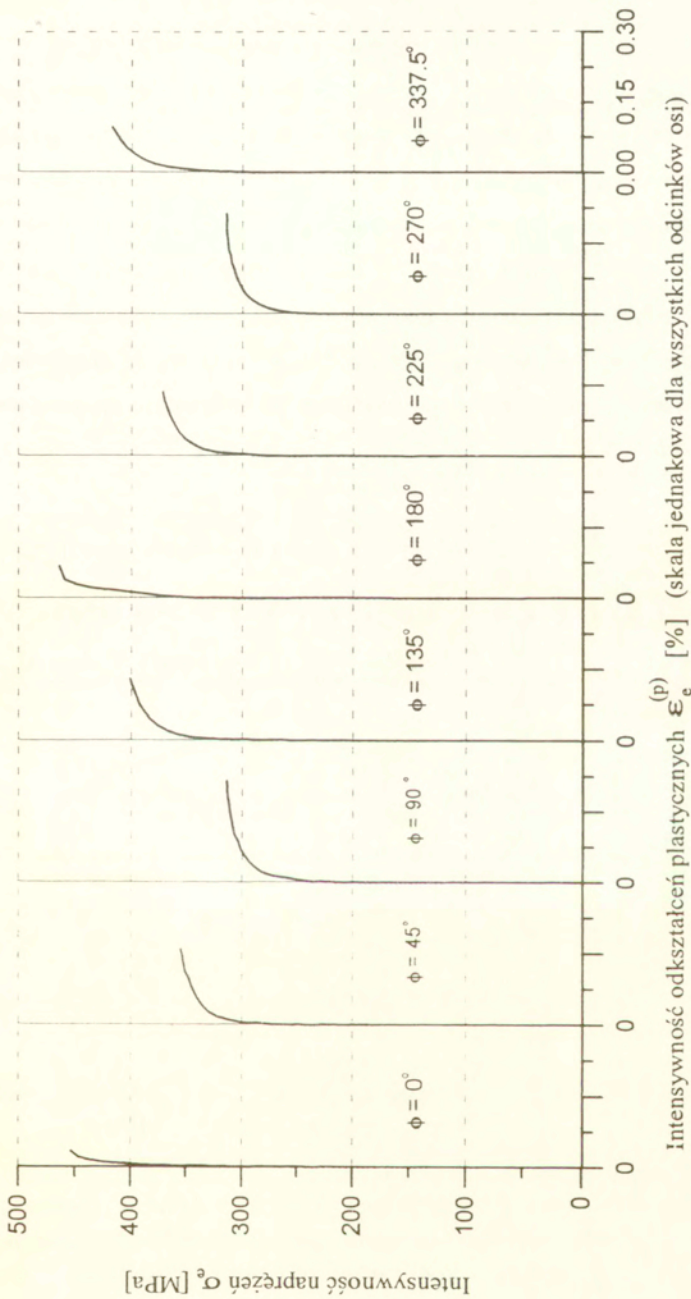


Rys.17 Przykładowy przebieg programu obciążeń cyklicznych o malejącej amplitudzie dla dwukierunkowego skręcania w postaci wykresu zmian naprężenia w funkcji odkształcenia plastycznego. Widoczna krzywa szkieletowa, będąca obrazem punktów zwrotnych kolejnych pętli histerezy.

Przy pomocy programu komputerowego przetwarzania danych doświadczalnych DADiSP wyniki zarejestrowane w trakcie doświadczenia można automatycznie przetworzyć do postaci zależności od odkształceń plastycznych. Uzyskany w ten sposób wykres składowych naprężeń jako funkcje składowych odkształceń plastycznych przedstawiono na rys. 17 dla dwukierunkowego skręcania. Wykres ten stanowi ilustrację przyjętego sposobu otrzymywania krzywej

szkieletowej, będącej zbiorem punktów wierzchołkowych dla kolejnych pętli programu cykli o malejącej amplitudzie. Na rysunku tym widać zarysowaną się krzywą szkieletową, dla której zostały odjęte odkształcenia sprężyste.

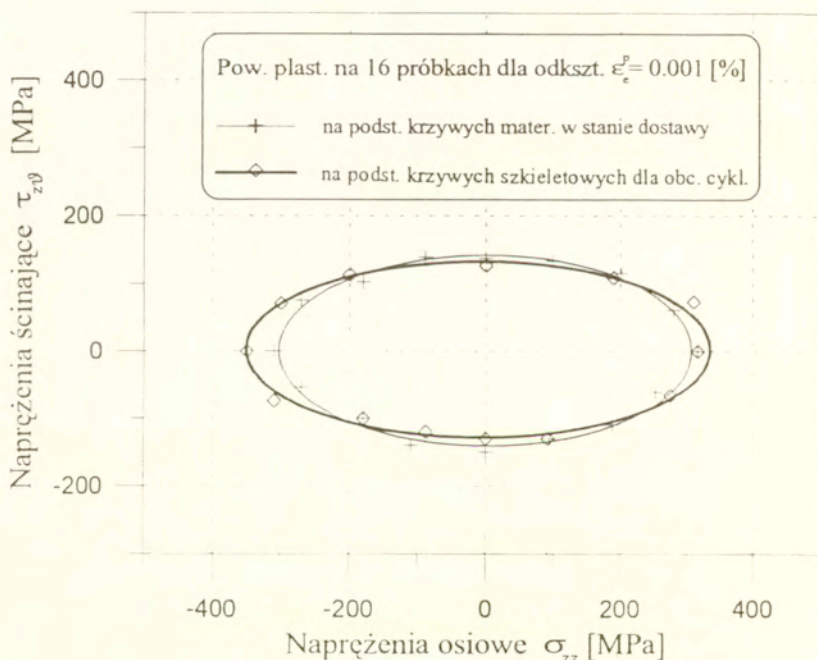
Rezultatem programu obciążeń cyklicznych, przeprowadzonego na szesnastu próbkach, z których każdą poddawano obciążeniom cyklicznym przy różnych złożonych stanach naprężenia, było szesnaście krzywych szkieletowych obrazujących właściwości mechaniczne materiału przy obciążeniach cyklicznych. Zestawienie otrzymanych krzywych szkieletowych dla wybranych ośmiu różnych kierunków obciążania cyklicznego przedstawiono w postaci wykresów intensywności naprężeń jako funkcji intensywności odkształceń plastycznych na rys. 18. Zależność otrzymanych krzywych szkieletowych od kierunku obciążeń cyklicznych jest tu wyraźnie widoczna. Krzywe dla poszczególnych kierunków różnią się wartościami granicy plastyczności i wartościami modułów wzmocnienia w zakresie plastycznym. Widoczne na rys. 18 różnice w wartościach maksymalnych odkształceń plastycznych, uzyskanych dla poszczególnych krzywych szkieletowych, wynikają z przyjętego sposobu wyznaczania krzywej szkieletowej z zachowaniem stałej amplitudy efektywnych odkształceń całkowitych obliczonych ze wzoru (4). Różnice te nie są jednak istotne przy wyznaczaniu umownych granic plastyczności dla krzywych szkieletowych, odpowiadających znacznie mniejszym wartościom odkształceń plastycznych. Widoczna na rys. 18 zależność poszczególnych krzywych szkieletowych od kierunku obciążeń cyklicznych wskazuje na anizotropię właściwości mechanicznych badanego materiału przy cyklicznych deformacjach. Krzywe szkieletowe zmieniają się w sposób cykliczny w zależności od kierunku obciążania, a krzywe dla symetrycznych kątów obciążenia mają bardzo zbliżony przebieg. Wskazuje to, że kierunek pierwszego cyklu obciążenia nie ma wpływu na kształt krzywej szkieletowej.



Rys.18 Zestawienie krzywych szkieletowych w postaci zmian intensywności naprężeń jako funkcji intensywności odkształceń plastycznych dla ośmiu wybranych kierunków obciążeń cyklicznych.

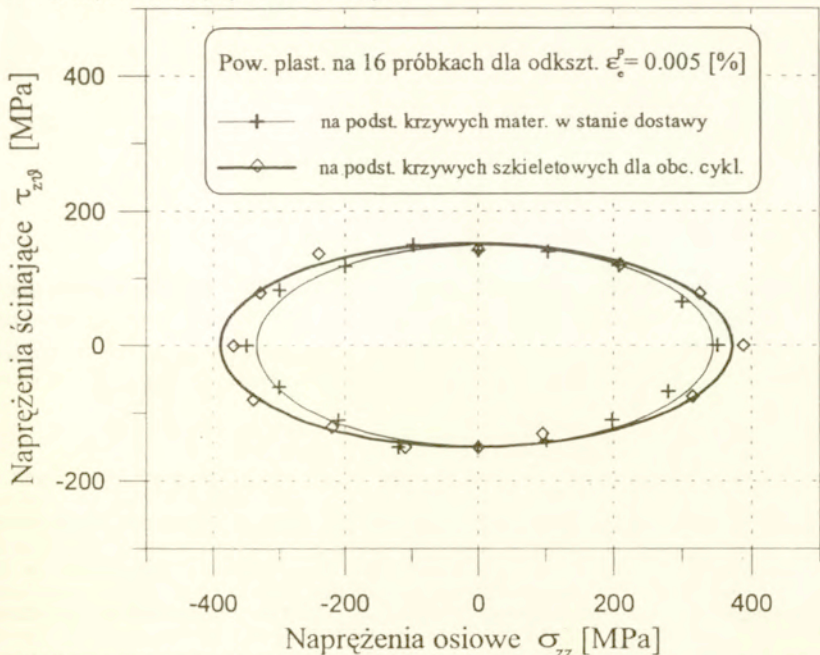
3.2.2 Powierzchnia plastyczności uzyskana z krzywych szkieletowych

Dla wszystkich szesnastu krzywych szkieletowych wyznaczono wartości umownych granic plastyczności odpowiadających trzem wartościom odkształceń plastycznych równych kolejno 0,001%; 0,005% i 0,01%. Tak zdefiniowane umowne granice plastyczności określają początek zakresu plastycznego, który jest zwykle utożsamiany z warunkiem plastyczności. W miarę zwiększania odkształceń plastycznych materiał ulega wzmocnieniu, które jest charakteryzowane za pomocą modułu wzmocnienia plastycznego. W pracy rozważa się zachowanie materiału tylko w początkowej części odkształceń plastycznych określającej postać warunku plastyczności.

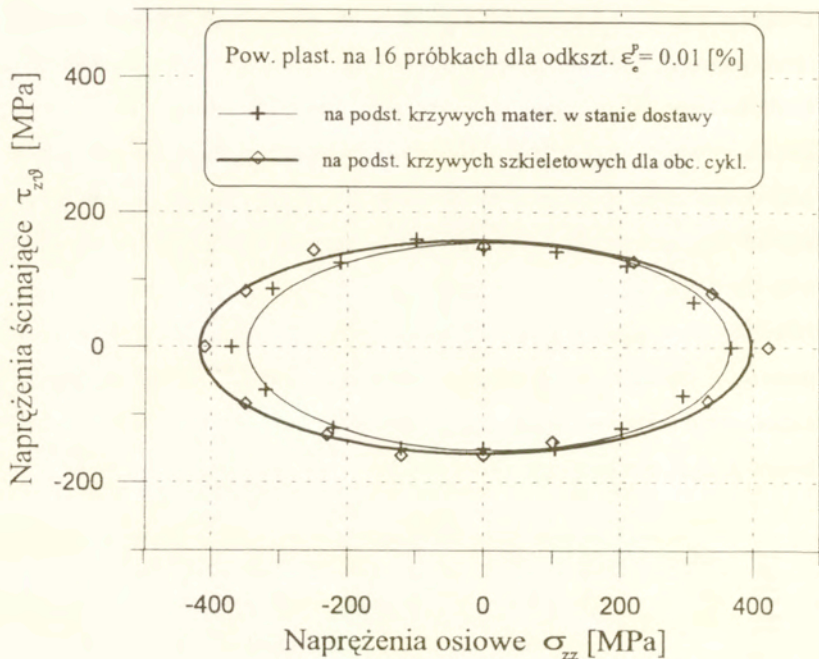


Rys. 19 Powierzchnia plastyczności materiału w stanie dostawy dla umownej granicy plastyczności odpowiadającej intensywności odkształcenia plastycznego 0,001% oraz cykliczna powierzchnia plastyczności uzyskana z krzywych szkieletowych dla takiej samej umownej granicy plastyczności.

Przedstawiona w dalszej części pracy interpretacja uzyskanych wyników badań związana jest z powierzchnią plastyczności odpowiadającą początkowi uplastycznienia materiału. Określone w ten sposób punkty doświadczalne dla danej wielkości uplastycznienia i szesnastu różnych kierunków obciążenia aproksymowano przy pomocy elipsy opisanej równaniem (8), w taki sam sposób jak przy wyznaczaniu powierzchni plastyczności badanego materiału w stanie dostawy. Wyniki dla tych trzech wielkości uplastycznienia przedstawiono na kolejnych rysunkach 19, 20 i 21, gdzie zaznaczono punkty doświadczalne otrzymane z krzywych szkieletowych i dla materiału w stanie dostawy a więc przed realizacją programu obciążeń cyklicznych. Zaznaczono również elipsy aproksymujące odpowiednie punkty doświadczalne, liniami cienkimi dla materiału w stanie dostawy i liniami grubymi dla krzywych szkieletowych.



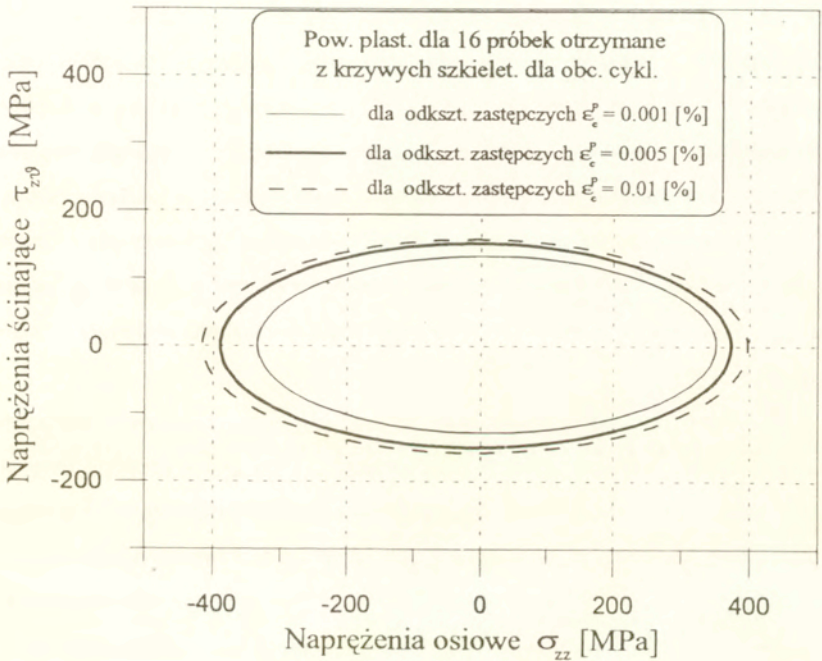
Rys. 20 Powierzchnia plastyczności materiału w stanie dostawy dla umownej granicy plastyczności odpowiadającej intensywności odkształcenia plastycznego 0,005% oraz cykliczna powierzchnia plastyczności uzyskana z krzywych szkieletowych dla takiej samej umownej granicy plastyczności.



Rys.21 Powierzchnia plastyczności materiału w stanie dostawy dla umownej granicy plastyczności odpowiadającej intensywności odkształcenia plastycznego 0,01% oraz cykliczna powierzchnia plastyczności uzyskana z krzywych szkieletowych dla takiej samej umownej granicy plastyczności.

Cykliczne powierzchnie plastyczności otrzymane z krzywych cyklicznych dla różnych kierunków obciążenia w rozpatrywanej przestrzeni naprężeń przedstawiono na jednym wykresie, rys.22, dla trzech umownych granic plastyczności w celu uwidocznienia ich wzajemnego położenia. Kształt i położenie cyklicznych powierzchni plastyczności otrzymanych na podstawie krzywych szkieletowych wskazują, że materiał zachował postać anizotropii ukształtowaną w procesie wytwórczym. Główna oś anizotropii zarówno dla materiału w stanie dostawy (rys.9)

jak i po wstępnej deformacji cyklicznej pokrywa się osią pręta, z którego wytoczono próbkę.

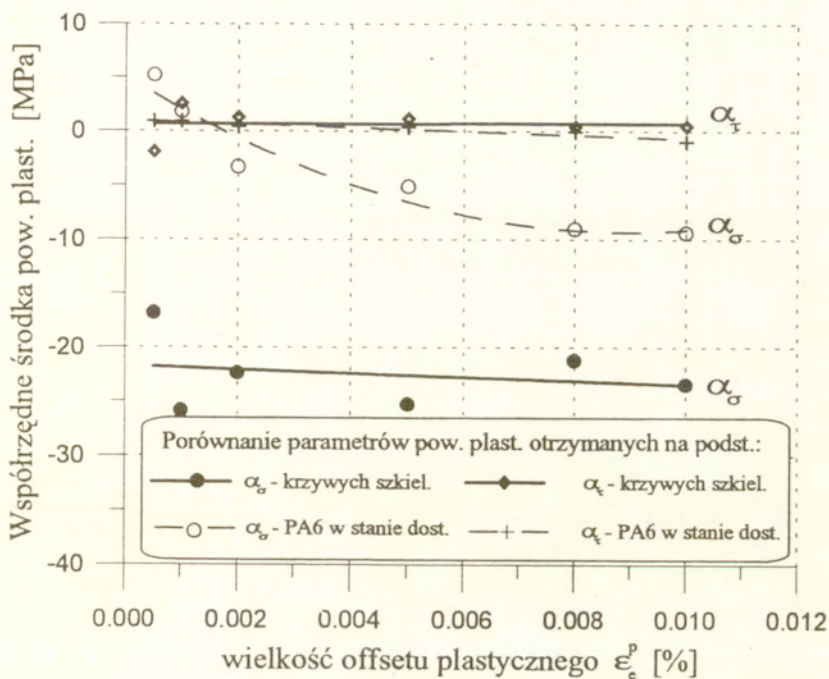


Rys.22 Zestawienie cyklicznych powierzchni plastyczności dla trzech umownych granic plastyczności.

Zestaw cyklicznych powierzchni plastyczności odzwierciedla w syntetycznym ujęciu zachowanie się materiału pod wpływem cyklicznych obciążeń w różnych kierunkach przestrzeni naprężeń. Cykliczna powierzchnia plastyczności umożliwia ocenę wpływu kierunku obciążeń cyklicznych na ewolucję właściwości mechanicznych materiału. Porównanie cyklicznych powierzchni plastyczności z odpowiadającymi powierzchniami plastyczności dla materiału w stanie dostawy (rys.19, 20 i 21)

wskazuje, że w rozważanym zakresie odkształceń definiujących granicę plastyczności stop aluminium PA6 w postaci wyciskanego pręta jest niewrażliwy na obciążenia cykliczne realizowane przy dwukierunkowym skręcaniu. Cykliczna i początkowa powierzchnia plastyczności są styczne do siebie na tym kierunku co wskazuje, że krzywa szkieletowa uzyskana przy cyklicznym skręcaniu próbki pokrywa się w zakresie rozpatrywanych granic plastyczności z krzywą naprężenie - odkształcenie uzyskaną dla materiału w stanie dostawy przy czystym skręcaniu. Natomiast pod wpływem obciążeń cyklicznych realizowanych w kierunku osiowym badany materiał wykazuje wyraźny efekt cyklicznego wzmocnienia. Granice plastyczności uzyskane przy cyklicznym obciążaniu w kierunku osiowym są większe od odpowiadających wartości przy monotonicznym obciążaniu materiału w stanie dostawy.

Cykliczne obciążenie realizowane w różnych, proporcjonalnych kierunkach rozpatrywanej przestrzeni naprężeń nie powoduje zmiany typu anizotropii materiału, tak że główne kierunki anizotropii ukształtowane w procesie wytwórczym nie ulegają zmianie pod wpływem obciążeń cyklicznych. Znajduje to również potwierdzenie w analizie wyników uzyskanych w pracy [31]. Jest to znacząca, jakościowa różnica w stosunku do zachowania się stali 18G2A pod wpływem obciążeń cyklicznych [30]. W badanym stopie aluminium nie ulegają zmianie, pod wpływem obciążeń cyklicznych, główne kierunki anizotropii, zmieniają się natomiast liczbowe wartości współczynników anizotropii. Wartości współrzędnych środka elipsy, otrzymanych dla powierzchni plastyczności uzyskanych przy monotonicznym obciążaniu materiału w stanie dostawy i na podstawie krzywych szkieletowych, zilustrowano na rys.23 jako funkcje przyjętej wielkości granicy plastyczności. W obu przypadkach współrzędna w kierunku naprężeń ścinających ma wartość zerową, natomiast cykliczna powierzchnia plastyczności jest nieco bardziej przesunięta w kierunku ujemnych wartości naprężeń osiowych w stosunku do początkowej powierzchni plastyczności. Przesunięcie to jest niezależne od przyjętej wielkości uplastycznienia.

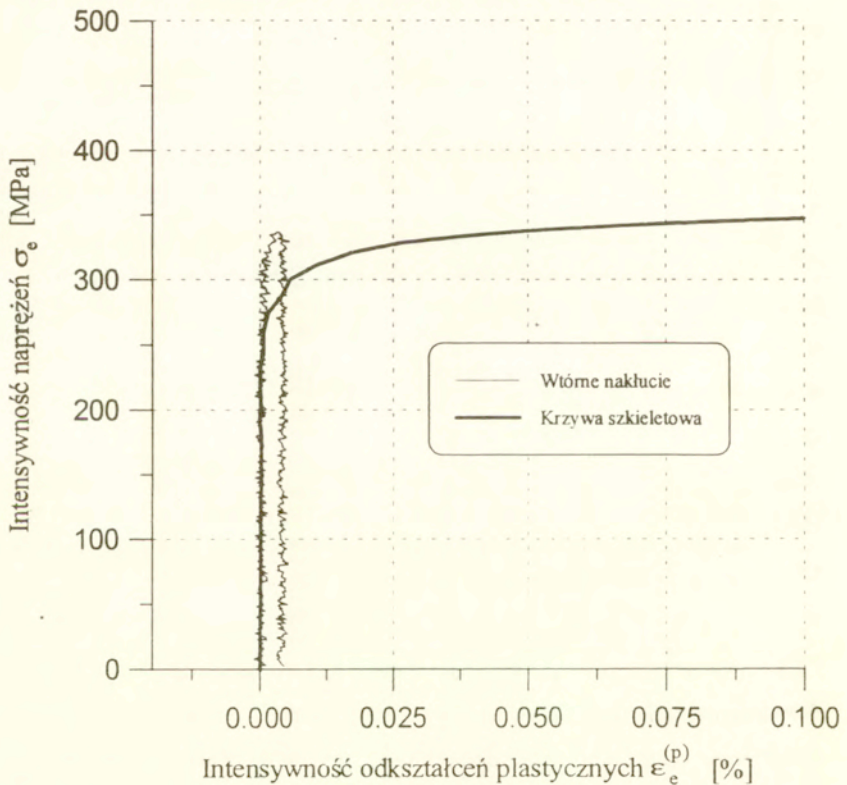


Rys. 23 Współrzędne środka początkowej powierzchni plastyczności i powierzchni wyznaczonej na podstawie krzywych szkieletowych jako funkcje wielkości offsetu określającego umowne granice plastyczności.

3.2.3 Powierzchnia plastyczności po wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach

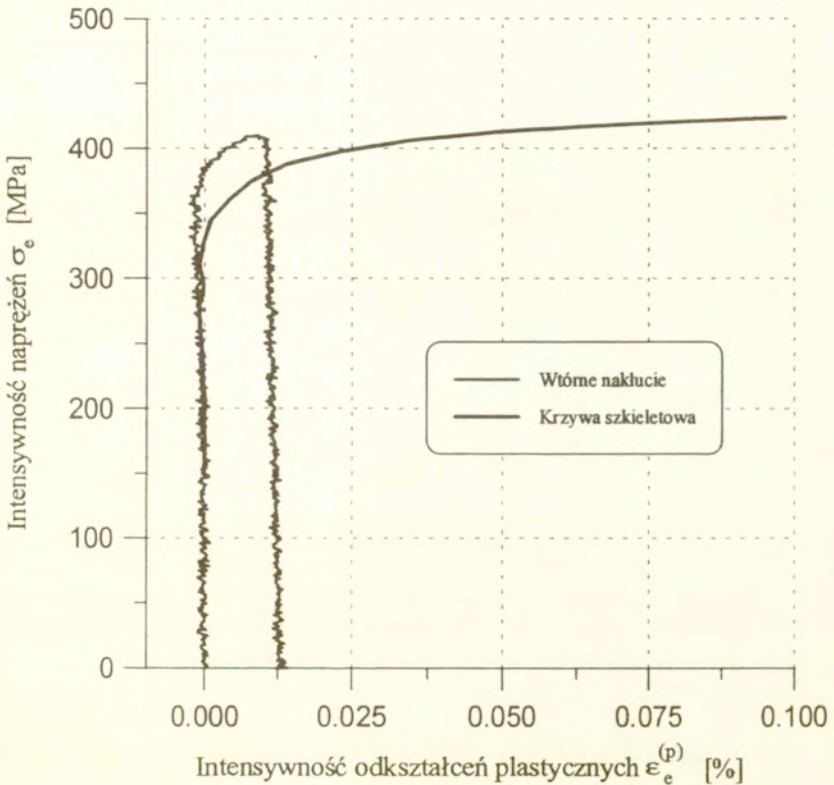
Trzeci etap programu doświadczalnego realizowano bezpośrednio po zakończeniu programu obciążeń cyklicznych. Historia obciążeń jednej próbki była więc następująca:

1. monotoniczne obciążanie w danym kierunku przestrzeni naprężeń do określonej wartości odkształceń plastycznych w celu wyznaczenia początkowej powierzchni plastyczności,
2. obciążanie cykliczne o stałej a następnie malejącej amplitudzie odkształceń całkowitych w celu wyznaczenia krzywych szkieletowych,
3. monotoniczne obciążanie do określonej wartości odkształceń plastycznych bezpośrednio po zakończeniu programu obciążeń cyklicznych, w tym samym kierunku obciążenia jaki realizowano dla tej próbki w punkcie 1.



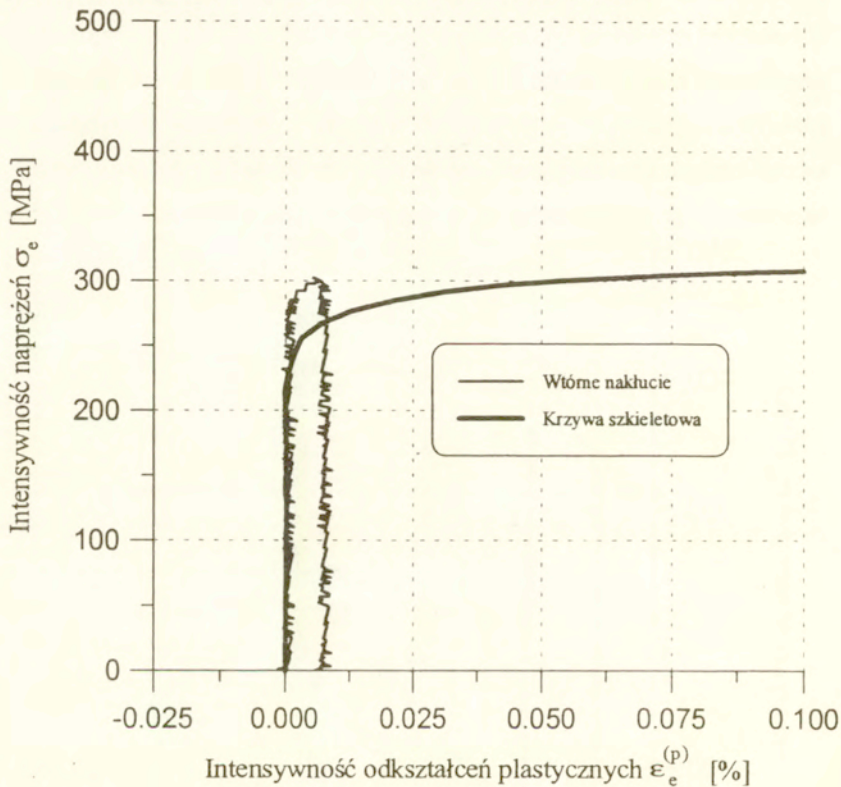
Rys.24 Krzywa naprężenie - odkształcenie plastyczne uzyskana przy monotonicznym obciążaniu w kierunku 45° , bezpośrednio po programie obciążeń cyklicznych i krzywa szkieletowa dla tego samego kierunku obciążania.

Uzyskano w ten sposób krzywe naprężenie - odkształcenie dla materiału poddanego wstępnej deformacji cyklicznej, przy czym dla każdej z próbek inny był kierunek proporcjonalnej drogi obciążeń cyklicznych. Przykładowe wyniki tej serii doświadczeń przedstawiono na kolejnych rysunkach 24, 25 i 26, dla trzech różnych wartości kąta kierunku obciążania równych 45° ; $157,5^\circ$ i 270° , w postaci zależności intensywności naprężeń w funkcji intensywności odkształceń plastycznych. Na każdym rysunku pokazano jednocześnie przebieg krzywej szkieletowej, otrzymanej na podstawie programu obciążeń cyklicznych w danym kierunku, oraz przebieg



Rys.25 Krzywa naprężenie - odkształcenie plastyczne uzyskana przy monotonicznym obciążaniu w kierunku $157,5^\circ$, bezpośrednio po programie obciążeń cyklicznych i krzywa szkieletowa dla tego samego kierunku obciążania.

wtórnego nakłucia następującego bezpośrednio po wstępnych obciążeniach cyklicznych. Krzywe monotonicznego nakłuwania do określonej wartości odkształceń plastycznych zaznaczono na omawianych rysunkach cienkimi liniami.



Rys.26 Krzywa naprężenie - odkształcenie plastyczne uzyskana przy monotonicznym obciążaniu w kierunku 270° , bezpośrednio po programie obciążeń cyklicznych i krzywa szkieletowa dla tego samego kierunku obciążania.

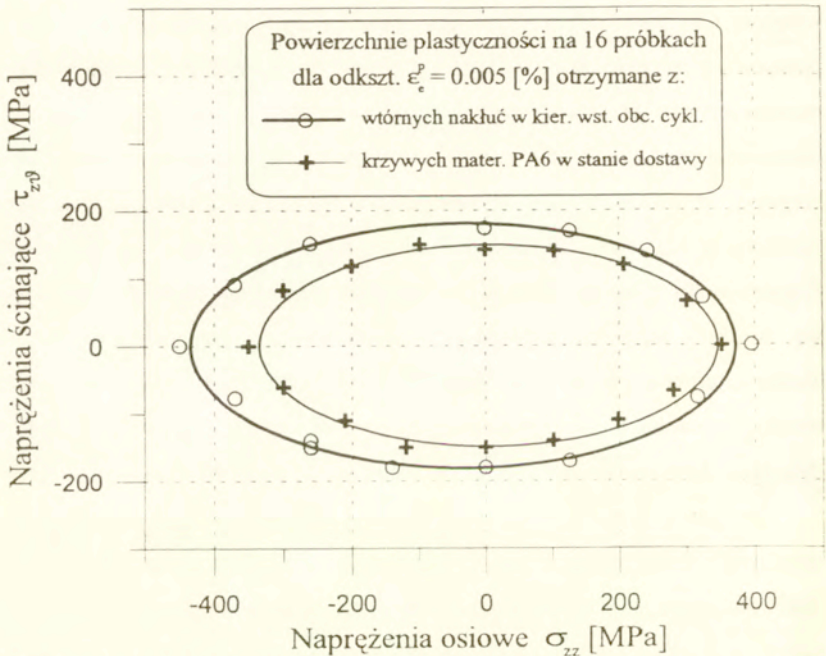
Sposób realizacji trzeciego etapu programu był jednakowy dla wszystkich próbek. Bezpośrednio po zakończeniu programu obciążeń cyklicznych wprowadzano do komputera program sterujący pracą maszyny wytrzymałościowej przy monotonicznym obciążaniu w określonym kierunku do zadanej wartości odkształceń

plastycznych i uruchamiano jego realizację. Zwłoka czasowa od zakończenia programu obciążeń cyklicznych do uruchomienia monotonicznego obciążania nie przekraczała kilku minut. Inną była prędkość odkształcania w obu tych programach, która wynosiła $2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ przy realizacji obciążeń cyklicznych ze stałą amplitudą odkształceń całkowitych oraz $5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ przy realizacji monotonicznego obciążania do określonej wartości odkształceń plastycznych.

Dla całej serii szesnastu próbek otrzymano taki sam wynik jakościowy. Wszystkie krzywe monotonicznego obciążania, realizowanego bezpośrednio po wstępnej deformacji cyklicznej w tym samym kierunku, przebiegają w zakresie plastycznym ponad krzywą szkieletową. Granice plastyczności uzyskane z krzywych monotonicznego obciążania po wstępnej deformacji cyklicznej są większe od odpowiadających granic plastyczności określonych na podstawie odpowiadających krzywych szkieletowych. Jest to więc znowu jakościowa różnica w stosunku do zachowania się stali 18G2A przy takim samym programie obciążania [30]. Przedstawione tu wyniki wskazują, że dla badanego stopu aluminium nie powinno się określać krzywej szkieletowej w złożonych stanach naprężenia według wymienionego na wstępie i postulowanego w literaturze dla stanów jednoosiowych - trzeciego sposobu, tj. na podstawie monotonicznego obciążania próbki po cyklicznej deformacji, której celem jest doprowadzenie do stabilizacji pętli histerezy.

Otrzymany w ten sposób zbiór punktów doświadczalnych, reprezentujących taką samą granicę plastyczności dla wszystkich szesnastu kierunków obciążania, daje nam obraz powierzchni plastyczności dla materiału hipotetycznego, bowiem każdy z punktów doświadczalnych tak otrzymanej powierzchni po wstępnej deformacji cyklicznej uzyskano dla innego kierunku tej deformacji cyklicznej. Tak uzyskane powierzchnie plastyczności nie reprezentują więc właściwości mechanicznych materiału rzeczywistego, a jedynie obrazują zdolność do zmian granic plastyczności materiału pod wpływem różnokierunkowej deformacji cyklicznej. Powierzchnie te są miejscem geometrycznym punktów doświadczalnych określających zmianę granicy plastyczności pod wpływem deformacji cyklicznej w

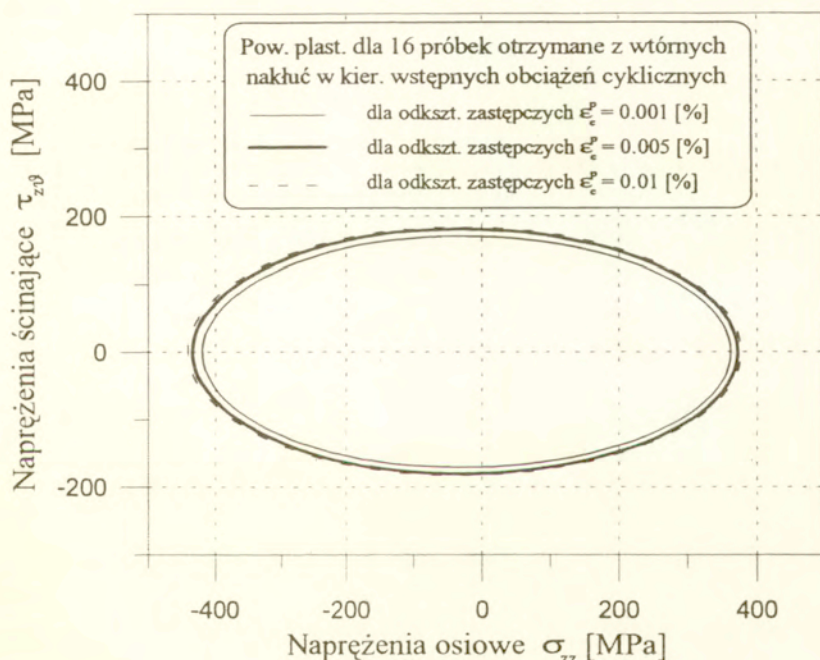
tym samym kierunku i obrazują graniczne możliwości zmiany powierzchni plastyczności materiału pod wpływem deformacji cyklicznej realizowanej w różnych kierunkach. Są to więc powierzchnie graniczne reprezentujące zdolność badanego materiału do zmiany parametrów mechanicznych pod wpływem cyklicznej deformacji w różnych kierunkach, w płaszczyźnie naprężeń ($\sigma_{zz}, \tau_{z\theta}$). Punkty doświadczalne uzyskane z krzywych monotonicznego obciążania po programie obciążeń cyklicznych przedstawiono na rys. 27 dla jednej wartości umownej granicy plastyczności odpowiadającej odkształceniom plastycznym równym 0,005%.



Rys. 27 Porównanie powierzchni dla umownej granicy plastyczności 0.005% otrzymanych z wtórnych nakłuc w kierunku wstępujących obciążeń cyklicznych i dla materiału w stanie dostawy.

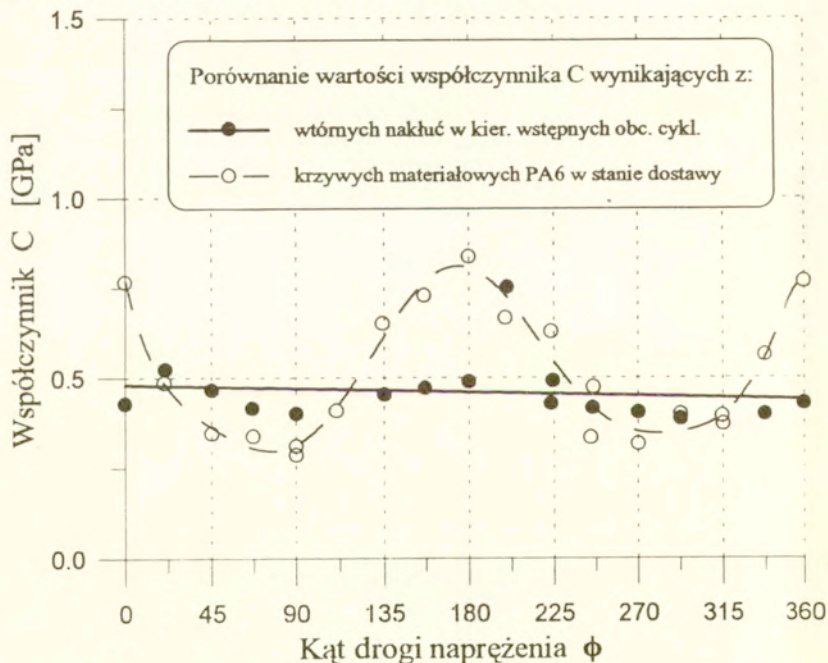
Podano tam również punkty doświadczalne otrzymane dla materiału w stanie dostawy. Punkty doświadczalne uzyskane dla szesnastu różnych próbek

aprosymowano równaniem elipsy (8), zgodnie z opisaną wcześniej procedurą. Wzajemne położenie obu tych powierzchni plastyczności obrazuje wpływ kierunku obciążeń cyklicznych na ewolucję właściwości mechanicznych materiału. Widać tu wyraźnie, że zdolność badanego stopu aluminium do umocnienia pod wpływem wstępnej deformacji cyklicznej jest największa dla jednociosowego ściskania i zmniejsza się stopniowo w miarę zwiększania kąta działania obciążeń cyklicznych w stosunku do kierunku ściskania. Jest to kolejna, jakościowa różnica w stosunku do zachowania się stali 18G2A przy takim samym programie obciążania [30].

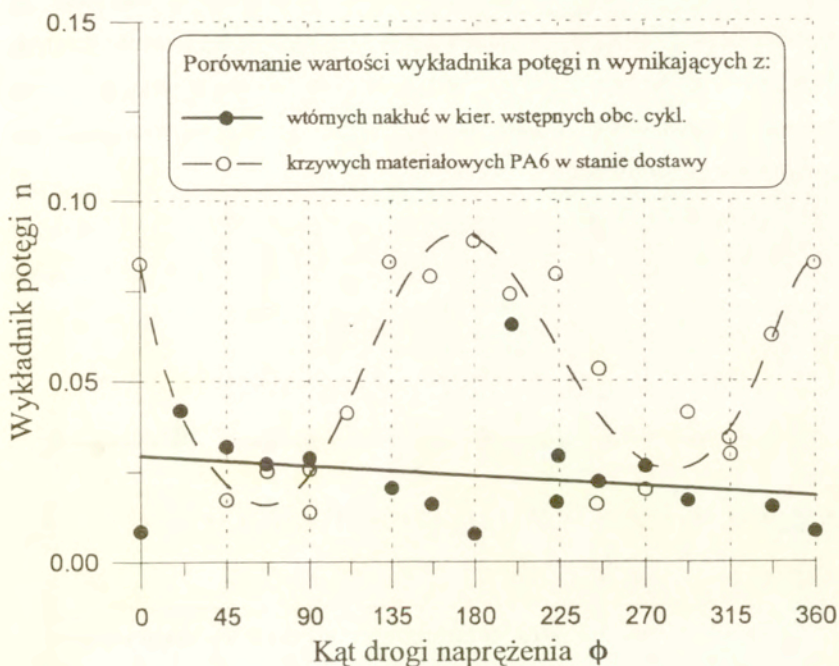


Rys.28 Powierzchnie graniczne dla trzech umownych granic plastyczności obrazujące zdolność materiału do wzmocnienia pod wpływem różnokierunkowej deformacji plastycznej.

Wyznaczenie kilku powierzchni plastyczności, odpowiadających różnym wielkościom granicy plastyczności na podstawie przebiegów krzywych monotonicznego obciążania w różnych kierunkach po wstępnej deformacji plastycznej, które przedstawiono na rys. 28, ilustruje inną jeszcze cechę badanego materiału. Wszystkie te powierzchnie graniczne dla trzech granic plastyczności są równo i w małych odstępach oddalone od siebie, co świadczy o małym module wzmocnienia plastycznego, jednakowym dla wszystkich kierunków obciążenia, jaki zostaje ukształtowany pod wpływem wstępnej deformacji cyklicznej. Wszystkie krzywe intensywności naprężeń jako funkcji intensywności odkształceń plastycznych mają zbliżoną krzywiznę na przejściu od zakresu sprężystego do zakresu plastycznego niezależnie od kierunku działania obciążenia.



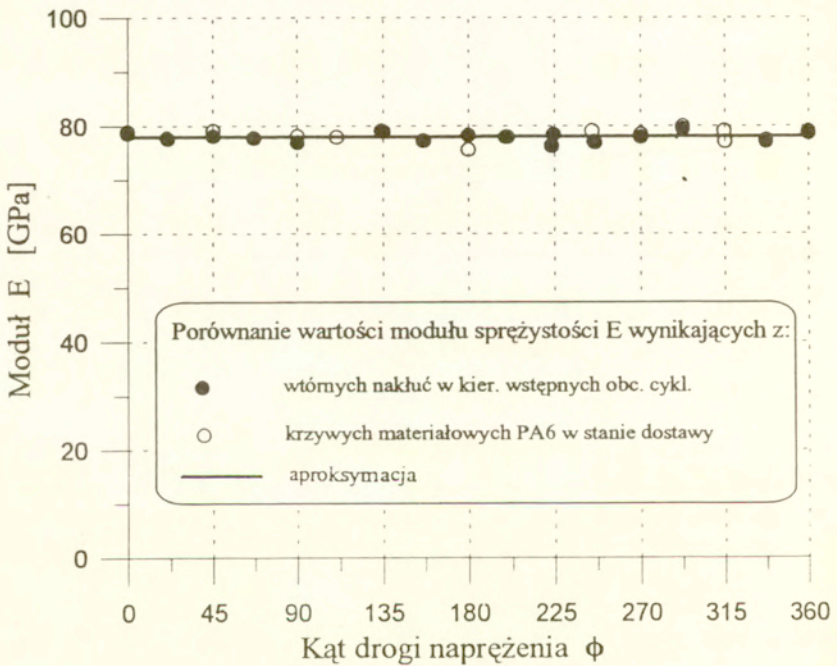
Rys.29 Wartości współczynnika C w równaniu (9) jako funkcja kierunku obciążania dla materiału w stanie dostawy i po wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach.



Rys.30 Wartości wykładnika potęgi n w równaniu (9) jako funkcja kierunku obciążania dla materiału w stanie dostawy i po wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach.

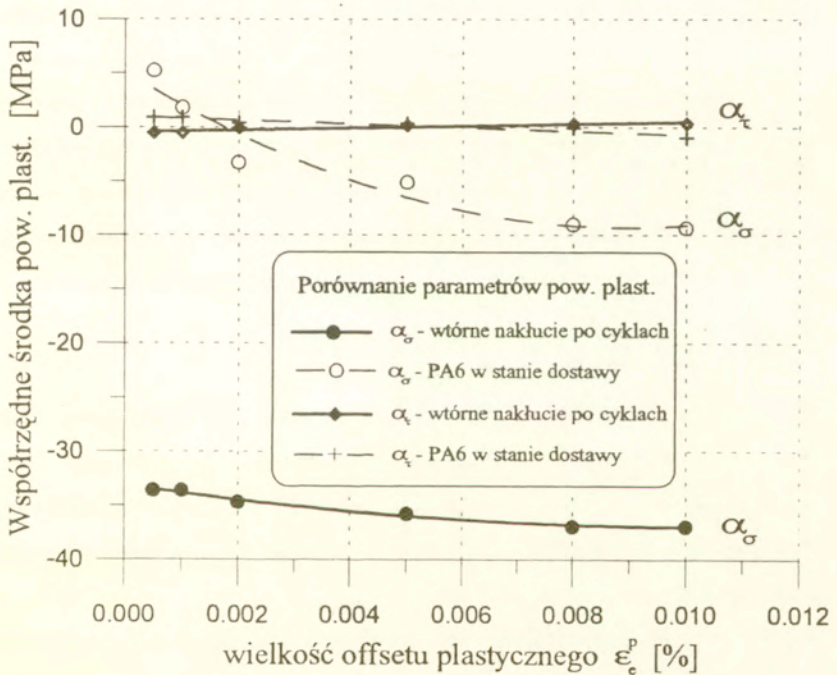
Charakter wzmocnienia materiału w zakresie plastycznym określony jest postacią przyjętego równania aproksymującego punkty doświadczalne (9) i wynika z liczbowych wartości współczynnika C oraz wykładnika potęgi n tego równania. Wartości tych wielkości jako funkcji kierunku drogi obciążania przedstawiono na rys.29 dla współczynnika C i na rys. 30 dla wykładnika n . Na rysunkach tych przedstawiono również zmiany tych wielkości dla materiału w stanie dostawy. W

przypadku materiału w stanie dostawy, zarówno współczynnik C jak i wykładnik potęgi n wykazują cykliczną zależność od kierunku obciążania. Natomiast po wstępnej deformacji cyklicznej, pomimo rozrzutów pomiarowych, zależność obu tych wielkości od kierunku obciążania jest pomijalnie mała i można przyjąć, że krzywe naprężenie - odkształcenie plastyczne są opisane jednakowym równaniem dla wszystkich kierunków obciążeń.



Rys.31 Wartości modułu sprężystości E jako funkcja kierunku obciążania dla materiału w stanie dostawy i po wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach.

Przedstawione wyniki badań wskazują na wyraźną anizotropię badanego stopu aluminium w zakresie plastycznym zarówno dla materiału w stanie dostawy jak i po celowo zadanej deformacji cyklicznej. Natomiast w zakresie sprężystym anizotropia nie występuje. Na rys. 31 zestawiono wartości modułów sprężystości określonych na podstawie przebiegów zależności intensywności naprężenia jako funkcji intensywności odkształcenia całkowitego dla wszystkich szesnastu próbek dla materiału w stanie dostawy i dla wtórnego obciążania monotonicznego po wstępnej deformacji cyklicznej.



Rys.32 Współrzędne środka powierzchni plastyczności jako funkcje wartości odkształceń plastycznych definiujących umowną granicę plastyczności dla materiału w stanie dostawy i po wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach.

Ułożenie punktów doświadczalnych dla różnych kierunków obciążania nie wskazuje ani na wpływ cyklicznej deformacji na moduł sprężystości materiału, ani na zależność tego modułu od kierunku obciążania. Jest to kolejna różnica zachowania się badanego materiału w stosunku do przedstawionych wcześniej wyników dla stali 18G2A przy takim samym programie obciążen.

Współrzędne środków elips aproksymujących, przedstawionych na rys.28 dla punktów doświadczalnych wyznaczonych po uprzedniej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach, pokazano na rys.32 jako funkcje wartości intensywności odkształceń plastycznych definiujących umowną granicę plastyczności. Podobnie do prezentowanych wcześniej analogicznych wyników uzyskanych z krzywych szkieletowych (rys.23) również i w tym przypadku nie obserwuje się przesunięcia elipsy w kierunku osi naprężeń ścinających. Zwiększa się natomiast przesunięcie środka elipsy w kierunku ujemnych naprężeń osiowych zarówno w odniesieniu do wartości początkowych dla materiału w stanie dostawy jak też do wartości uzyskanych na podstawie krzywych szkieletowych. Wartość tego przesunięcia jest prawie niezależna od przyjętego offsetu określającego uplastycznienie materiału.

4. Zestawienie uzyskanych wyników

Przeprowadzony program doświadczalny umożliwił wyznaczenie trzech różnych rodzajów powierzchni ilustrujących stan badanego stopu aluminium.

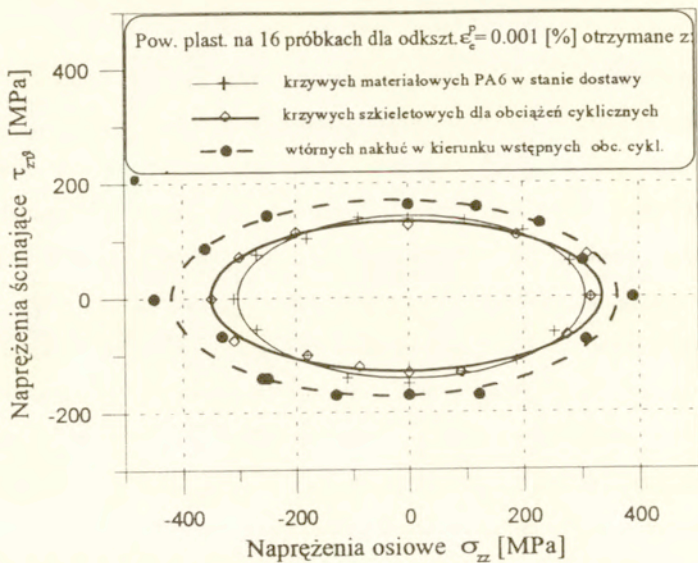
Pierwsza powierzchnia plastyczności uzyskana z monotonicznego obciążania próbek w różnych kierunkach przestrzeni naprężeń reprezentuje właściwości mechaniczne materiału w stanie dostawy.

W etapie drugim, w którym próbki obciążano cyklicznie w różnych kierunkach przestrzeni naprężeń wyznaczono krzywe szkieletowe, zwane też krzywymi cyklicznymi, dla różnych kierunków obciążania. Na podstawie krzywych szkieletowych wyznaczono cykliczne powierzchnie plastyczności reprezentujące właściwości mechaniczne materiału przy cyklicznych obciążeniach. Znaczenie tak wyznaczonej powierzchni plastyczności wynika z coraz częstszego stosowania

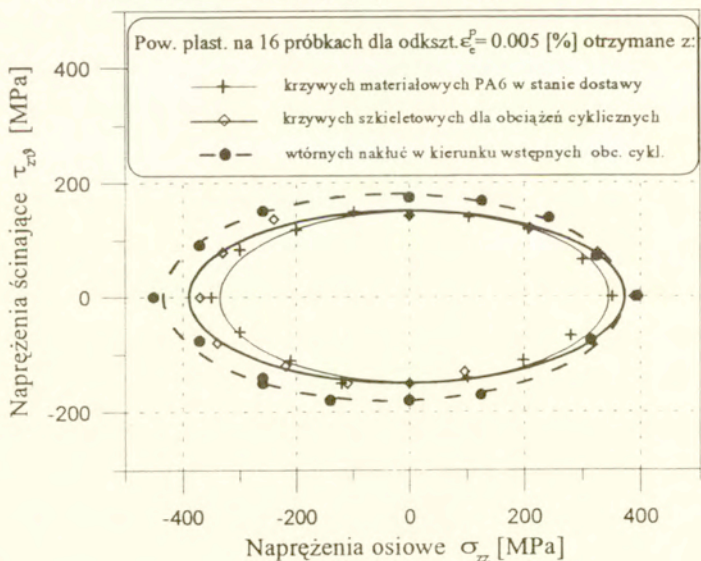
krzywej szkieletowej w obliczeniach numerycznych jako zastępczej krzywej materiałowej dla stanów jednoosiowych obciążeń cyklicznych.

Trzecia powierzchnia plastyczności wyznaczona została na podstawie monotonicznego obciążania próbek w różnych kierunkach bezpośrednio po zakończeniu programu obciążeń cyklicznych o takim samym kierunku działania. Powierzchnia ta odzwierciedla graniczne możliwości zmian granic plastyczności materiału w różnych kierunkach pod wpływem obciążeń cyklicznych realizowanych w tych samych kierunkach. Powierzchnia ta stanowi obwiednię wszystkich powierzchni plastyczności materiału poddanego wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach rozpatrywanej przestrzeni naprężeń.

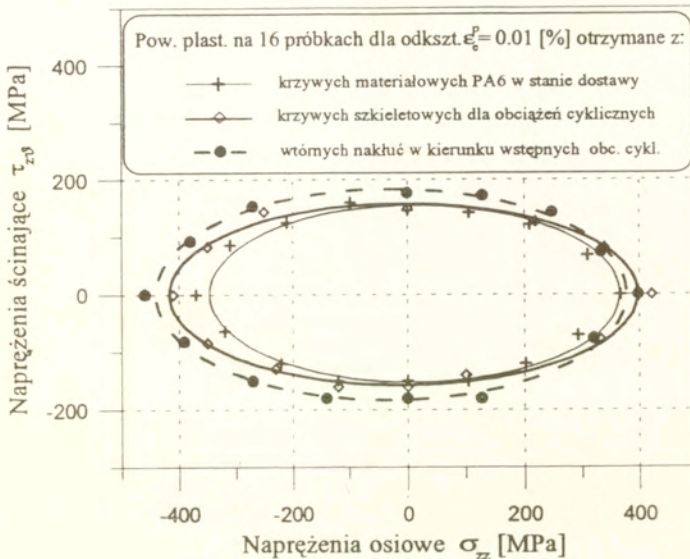
Zestawienie kompletu takich trzech powierzchni dla różnych wartości umownych granic plastyczności, równych odpowiednio 0,001%; 0,005% i 0,01%, przedstawiono na rys.33, 34 i 35. Na rysunkach tych zaznaczono punkty doświadczalne otrzymane dla szesnastu różnych próbek, z których każda była obciążana w innym kierunku rozpatrywanej przestrzeni naprężeń, jak również zaznaczono zarysy elips aproksymujących podane punkty doświadczalne według wcześniej przedstawionej procedury. Wzajemne położenie pokazanych trzech rodzajów powierzchni odzwierciedla zmiany właściwości mechanicznych badanego materiału pod wpływem obciążeń cyklicznych, realizowanych w złożonych stanach naprężenia przy różnych proporcjach pomiędzy składowymi naprężeniami. Wzajemne położenie początkowych i cyklicznych powierzchni plastyczności uzyskanych na podstawie krzywych szkieletowych wskazuje na nierównomierny, zależny od kierunku działania obciążenia, wpływ obciążeń cyklicznych na zmianę właściwości mechanicznych. Wpływ ten jest związany z kierunkiem głównej osi wstępnej anizotropii ukształtowanej w procesie wytwórczym.



Rys.33 Punkty doświadczalne i aproksymujące je elipsy odpowiadające umownej granicy plastyczności 0,001% dla trzech rodzajów powierzchni uzyskanych dla materiału w stanie dostawy, po wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach i na podstawie krzywych szkieletowych.



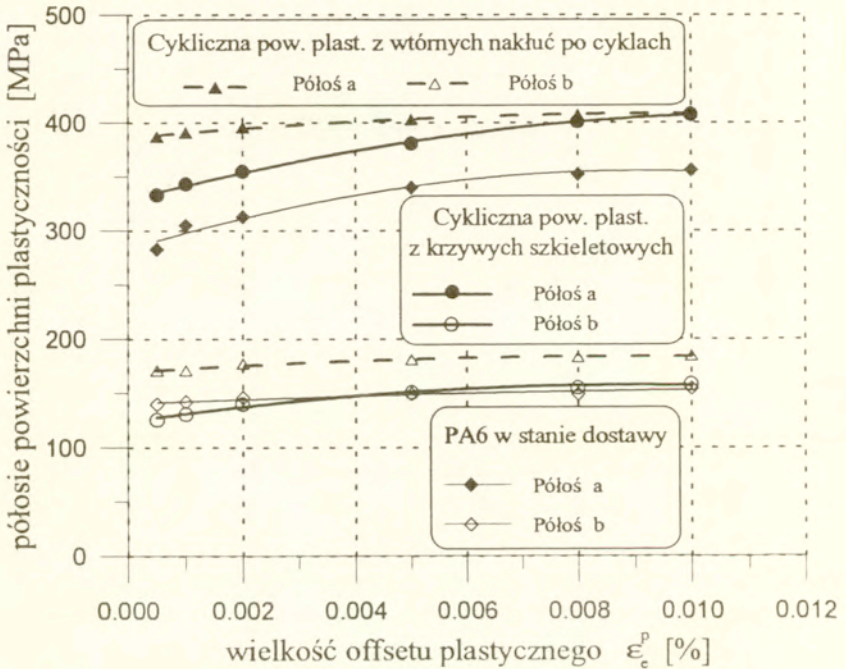
Rys.34 Punkty doświadczalne i aproksymujące je elipsy odpowiadające umownej granicy plastyczności 0,005% dla trzech rodzajów powierzchni uzyskanych dla materiału w stanie dostawy, po wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach i na podstawie krzywych szkieletowych.



Rys.35 Punkty doświadczalne i aproksymujące je elipsy odpowiadające umownej granicy plastyczności 0,01% dla trzech rodzajów powierzchni uzyskanych dla materiału w stanie dostawy, po wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach i na podstawie krzywych szkieletowych.

Z kolei wzajemne położenie cyklicznej powierzchni plastyczności uzyskanej na podstawie krzywych szkieletowych i granicznej powierzchni plastyczności uzyskanej na podstawie monotonicznego obciążania po uprzedniej wstępnej deformacji cyklicznej uwiadczenia regularne różnice wskazujące, że dla badanego stopu aluminium te dwie powierzchnie nie mogą być utożsamiane ze sobą jak to się obserwuje dla innych materiałów [30]. Różnice te są związane z odmiennym przebiegiem krzywej szkieletowej w porównaniu do krzywej naprężenie - odkształcenie po wstępnej deformacji cyklicznej w tym kierunku. Jest to istotne, bowiem podważa jeden ze stosowanych sposobów wyznaczania krzywej

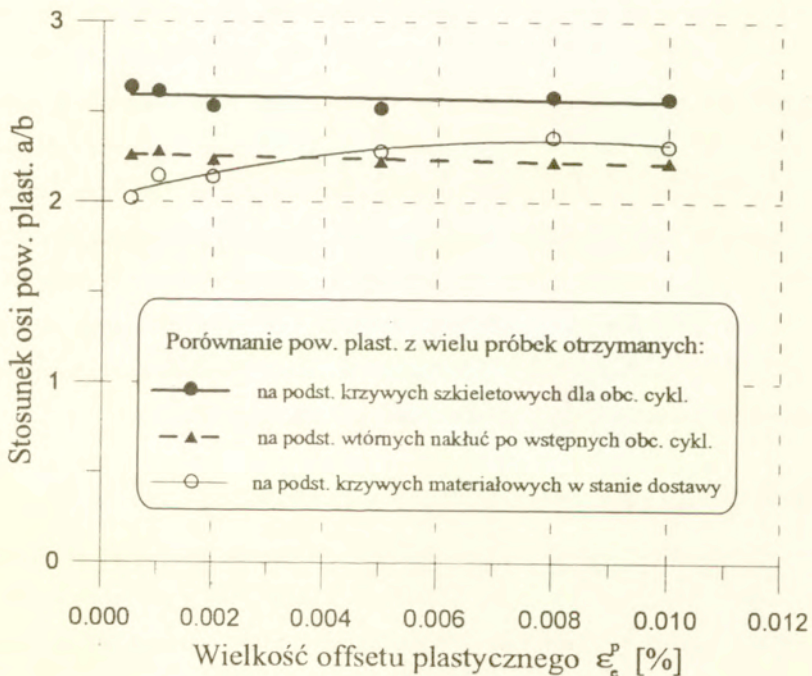
szkieletowej materiału, wymieniony jako trzecia pozycja we wstępnej części niniejszej pracy.



Rys.36 Wartości wielkiej i małej półosi dla trzech rodzajów powierzchni uzyskanych dla materiału w stanie dostawy, po wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach i na podstawie krzywych szkieletowych jako funkcje wartości odkształceń plastycznych określających umowne granice plastyczności.

Przedstawione na rys. 33, 34 i 35 obrazy trzech typów powierzchni opisujących właściwości mechaniczne uwidaczniają niewielkie zmiany wartości liczbowych współczynników anizotropii ukształtowanej w procesie wytwórczym pod wpływem wstępnej deformacji cyklicznej. Postać wstępnej anizotropii plastycznej opisanej warunkiem plastyczności dla badanego materiału w stanie dostawy zostaje zachowana, a pod wpływem deformacji cyklicznej ulegają tylko niewielkiej

modyfikacji wartości liczbowe współczynników anizotropii. Zmiany współrzędnych środków elips aproksymujących punkty doświadczalne dla różnych programów obciążeń przedstawiono już wcześniej na rys. 23 i 32. Natomiast na rys.36 przedstawiono dla trzech rozważanych typów powierzchni wartości wielkiej i małej półosi elips aproksymujących jako funkcje wartości odkształceń plastycznych przyjętych w celu określenia umownych granic plastyczności. Ułożenie punktów doświadczalnych i ich regularne przebiegi jeszcze wyraźniej uzasadniają podane już wcześniej wnioski.



Rys.37 Stosunek wielkiej i małej osi dla trzech rodzajów powierzchni uzyskanych dla materiału w stanie dostawy, po wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach i na podstawie krzywych szkieletowych jako funkcje wartości odkształceń plastycznych określających umowne granice plastyczności.

Mała półoś elipsy aproksymującej pokrywająca się z kierunkiem ścinania jest taka sama dla materiału w stanie dostawy jak i wyznaczona z krzywych szkieletowych. Natomiast wielka półoś elipsy aproksymującej, pokrywająca się z kierunkiem osiowym, jest większa dla powierzchni wyznaczonej z krzywej szkieletowej w porównaniu do półosi wstępnej powierzchni plastyczności. W przypadku granicznej powierzchni uzyskanej dla monotonicznego obciążania próbki, poddanej uprzednio wstępnej deformacji cyklicznej, obie półosi ulegają zwiększeniu w stosunku do tych dwóch wcześniej wymienionych typów powierzchni opisujących właściwości mechaniczne materiału.

Stosunek wielkiej i małej osi elips aproksymujących wymienione trzy typy powierzchni dla różnych wielkości uplastycznienia przedstawiono na rys.37. Stosunek ten wynosi około 2,2 dla powierzchni plastyczności materiału w stanie dostawy i dla granicznej powierzchni plastyczności po wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach. Dla cyklicznej powierzchni plastyczności stosunek ten jest nieco większy i wynosi 2,6. Można więc stwierdzić, że w przypadku badanego stopu aluminium anizotropia materiału ukształtowana w procesie wytwórczym ulega tylko nieznacznej modyfikacji pod wpływem wstępnej deformacji cyklicznej. Jest to zachowanie jakościowo różne w porównaniu do innych materiałów, które cechuje izotropia właściwości mechanicznych w stanie początkowym [30].

5. Wnioski końcowe

Praca dotyczy badań doświadczalnych stopu aluminium PA6 w postaci wyciskanego pręta, z którego wytoczono cienkościenne próbki rurkowe do badań w warunkach złożonego stanu naprężenia. Badany materiał cechuje się w stanie dostawy wyraźną anizotropią właściwości mechanicznych związaną z teksturą ukształtowaną w procesie wytwórczym. Celem pracy było doświadczalne określenie zmian właściwości mechanicznych badanego materiału, opisanych powierzchnią plastyczności, pod wpływem obciążeń cyklicznych w zakresie niskocyklowego

zmęczenia. Uzyskane wyniki badań doświadczalnych prowadzą do następujących wniosków:

1. Zmiany właściwości mechanicznych badanego stopu aluminium pod wpływem obciążeń cyklicznych realizowanych przy różnych stanach naprężenia są nierównomierne i zależą od kierunku działania wstępnej deformacji cyklicznej w rozpatrywanej przestrzeni naprężeń.
2. Krzywe szkieletowe wyznaczone dla różnych stanów naprężenia są zależne od kierunku działania obciążenia cyklicznego, a wyznaczona na ich podstawie cykliczna powierzchnia plastyczności reprezentuje zdolność materiału do zmiany właściwości mechanicznych w warunkach złożonego stanu naprężenia w takim samym stopniu w jakim krzywa szkieletowa wskazuje na zdolność materiału do zmiany właściwości mechanicznych materiału przy cyklicznych obciążeniach w warunkach jednoosiowego obciążania.
3. Badany stop aluminium wykazuje cykliczne wzmocnienie w odniesieniu do granicy plastyczności tylko pod wpływem obciążeń, w których składowa naprężeń osiowych nie jest równa zero, a jest niewrażliwy na obciążenia cykliczne przy czystym skręcaniu w rozpatrywanym zakresie odkształceń.
4. Krzywa monotonicznego obciążania zrealizowanego bezpośrednio po zakończeniu programu obciążeń cyklicznych, którego celem było określenie krzywej szkieletowej w danym kierunku obciążania cyklicznego przebiega, w zakresie plastycznym, powyżej tej krzywej szkieletowej dla wszystkich kierunków obciążeń rozpatrywanej przestrzeni naprężeń.
5. Graniczna powierzchnia cyklicznego wzmocnienia, wyznaczona na podstawie monotonicznego wtórego obciążania w danym kierunku bezpośrednio po zakończeniu programu wstępnych obciążeń cyklicznych działających w tym samym kierunku, reprezentuje zdolność badanego materiału do wzmocnienia pod wpływem obciążeń cyklicznych realizowanych w złożonych stanach naprężenia.

6. Postać anizotropii plastycznej ukształtowanej w procesie wytwórczym badanego materiału nie ulega zmianie pod wpływem różnokierunkowej deformacji cyklicznej, zmianie ulegają jedynie wartości liczbowe współczynników anizotropii.
7. Stop aluminium PA6 wykazuje jakościowo odmienne zmiany pod wpływem wstępnych obciążeń cyklicznych realizowanych w złożonym stanie naprężenia w stosunku do stali 18G2A, która była badana przy takim samym programie obciążeń cyklicznych [30]. Takie zachowanie się stopu aluminium PA6 związane jest z anizotropią plastyczną ukształtowaną w procesie wytwórczym, w trakcie wyciskania półwyrobów w postaci prętów.

6. Podziękowania

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

7. Spis literatury

1. P.W. Landgraf, JoDean Morrow, T. Endo, Determination of the cyclic stress-strain curve, *Journal of Materials*, **4**, 1, 176-188, 1969.
2. M. Śliwowski, K. Turski, Wpływ cyklicznej plastycznej deformacji na powierzchnię plastyczności, *Mech. Teor. Stos.*, **3**, 12, 1974.
3. R. Marjanovic, W. Szczepiński, Yield surfaces of the M-63 brass prestrained by cyclic biaxial loading, *Arch. Mech.*, **26**, 311-320, 1974.
4. J. Miastkowski, Yield surface of material subjected to combined cyclic loading, *Arch. Mech.*, **30**, 203-215, 1978.
5. H.S. Lamba, O.M. Sidebottom, Cyclic plasticity for nonproportional paths, *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, **100**, 96-111, 1978.
6. E. Tanaka, S. Murakami, M. Ooka, Effects of plastic strain amplitudes on non-proportional cyclic plasticity, *Acta Mech.*, **57**, 167-182, 1985.
7. E. Tanaka, S. Murakami, M. Ooka, Effects of strain path shapes on non-proportional cyclic plasticity, *J. Mech. Phys. Solids*, **33**, 559-575, 1985.
8. Y. Ohashi, E. Tanaka, M. Ooka, Plastic deformation behavior of type 316 stainless steel subjected to out-of-phase strain cycles, *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, **107**, 286-292, 1985.

9. A. Benallal, P. LeGallo, D. Marquis, An experimental investigation of cyclic hardening of 316 stainless steel and 2024 aluminium alloy under multiaxial loadings, *Nucl. Eng. Des.*, **114**, 345-353, 1989.
10. E. Krempl, H. Lu, The path and amplitude dependence of cyclic hardening of type 304 stainless steel at room temperature, in: *Biaxial and multiaxial fatigue*, M. W. Brown and K. J. Miller, Eds, *Mechanical Engineering Publications*, 89-106, London 1989.
11. N. Ohno, Recent topics in constitutive modelling of cyclic plasticity and viscoplasticity, *Appl. Mech. Rev.*, **43**, 11, 283-295, 1990.
12. E. Krempl, Cyclic plasticity: some properties of the hysteresis curve of structural metals at room temperature, *ASME Journal of Basic Engineering*, **93**, 317-323, 1971.
13. D. Kujawski, E. Krempl, The rate (time)- dependent behavior of Ti-7Al-2Cb-1Ta titanium alloy at room temperature under quasi-static monotonic and cyclic loading, *ASME Journal of Applied Mechanics*, **48**, 55-63, 1981.
14. J. Lipkin, J.C. Swearingen, On the subsequent yielding of an aluminium alloy following cyclic prestraining, *Metallurgical Transaction A*, **6A**, 167-177, 1975.
15. H.S. Lamba, O.M. Sidebottom, Proportional biaxial cyclic hardening of annealed oxygen-free high-conductivity copper, *Journal of Testing and Evaluation*, **6**, 4, 260-267, 1978.
16. H. Ishikawa, K. Sasaki, Stress-strain relations of SUS304 stainless steel after cyclic preloading, *J. Eng. Mat. Techn.*, **111**, 417-423, 1989.
17. J. D. Morrow, Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals, *Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity*, ASTM STP 378, American Society for Testing and Materials, pp. 45-87, Philadelphia 1965.
18. C. Goss, S. Kocańda, Z. Mróz, Modelowanie cyklicznego zachowania się stali o podwyższonej wytrzymałości przy obciążeniu jednoosiowym w zakresie małej liczby cykli, *Biuletyn WAT*, **XXIX**, 5, 1980.
19. Chr. Boller, T. Seeger, *Materials data for cyclic loading, Part A: Unalloyed Steels (Materials Science Monographs, 42A)*, Elsevier, Amsterdam-Oxford - New York - Tokyo 1987.
20. D. L. McDowell, Multiaxial nonproportional cyclic deformation, Report No. 102, Dept. of Mech. and Industrial Eng., Univ. of Illinois, Urbana, May 1981.
21. D. L. McDowell, A two surface model for transient nonproportional cyclic plasticity, *ASME J. Appl. Mech.*, **52**, 298-308, 1985
22. Z. Mróz, On the description of anisotropic workhardening, *J. Mech. Phys. Solids*, **15**, 163-175, 1967

23. L. Dietrich, R. Kiryk, G. Socha, M. Śliwowski, Identyfikacja plastycznej anizotropii stopu aluminium, *Prace IPPT* 26/1994.
24. T. C. Hsu, Definition of the yield point in plasticity and its effect on the shape of the yield locus. *J. Strain Anal.*, **1**, 331 - 338, 1966.
25. W. Szczepiński, L. Dietrich, J. Miastkowski, Plastic properties of metals, part one in: *Experimental Methods in Mechanics of Solids*, PWN - Elsevier, 1990.
26. K. Ikegami, An historical perspective of the experimental study of subsequent yield surfaces for metal - parts 1&2, *P.Soc.Mat.Sci.*, vol.4, 1975, 491-505, and vol.24, 1975, 709-719.
27. S.S. Hecker, Experimental studies of yield phenomena in biaxially loaded metals, in: *Constitutive Equations in Viscoplasticity: Computational and Engineering Aspects*, The Winter Annual Meeting of The American Society of Mechanical Engineers, New York City, NY, Ed. Stricklin and Saczalski, ASME, AMD, **20**, 1-33, 1976.
28. R.V. Mises, Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen, *Zeitsch. Angew. Math. Mech.*, **8**, 3, 161-185, 1928.
29. W. Szczepiński, On deformation-induced plastic anisotropy of sheet metals, *Arch. Mech.*, **45**, 1, 3-38, 1993.
30. Z.L. Kowalewski, M. Śliwowski, G. Socha, Określenie cyklicznych własności stali 18G2A na podstawie krzywych szkieletowych dla płaskiego stanu naprężenia, *Prace IPPT (w druku)* 1994.
31. L. Dietrich, Z.L. Kowalewski, M. Śliwowski, Zmiany parametrów anizotropii stopu aluminium pod wpływem deformacji cyklicznej, *Prace IPPT (w druku)*, 1994.