

5.17.10. — obciążenia jedno-
i wieloosiowe

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

WPLYW RÓŻNOKIERUNKOWEJ DEFORMACJI
CYKLICZNEJ NA EWOLUCJĘ POWIERZCHNI
PLASTYCZNOŚCI STALI 18G2A

25/1994

P. 269

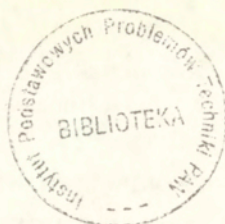


WARSZAWA 1994

<http://rcin.org.pl>

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 3 sierpnia 1994 r.



56624



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 2,5 Ark. druk. 3,1
Oddano do drukarni we wrześniu 1994 r.

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

<http://rcin.org.pl>

Zbigniew L. KOWALEWSKI
Marek ŚLIWOWSKI
Grzegorz SOCHA

Zakład Wytrzymałości Materiałów

WPLYW RÓŻNOKIERUNKOWEJ DEFORMACJI CYKLICZNEJ NA EWOLUCJĘ POWIERZCHNI PLASTYCZNOŚCI STALI 18G2A

Streszczenie

Prezentowana praca dotyczy badań doświadczalnych w złożonym stanie naprężenia, przeprowadzonych w celu określenia wpływu różnych form deformacji plastycznej na własności plastyczne stali niskostopowej 18G2A. Doświadczenia przeprowadzono na cienkościennych próbkach rurkowych w stanach naprężenia równomiernie pokrywających obszar wszystkich czterech ćwiartek płaszczyzny naprężenia (σ_x , τ_{xy}). W pierwszym etapie badań wyznaczono metodą testowania wielu próbek powierzchnię plastyczności materiału w stanie dostawy, która stanowiła punkt odniesienia do porównań zmian własności materiału pod wpływem celowo wprowadzonej deformacji. Program badań materiału z deformacją wstępną obejmował próby, w których odkształcenia początkowe wprowadzano w postaci: (1) obciążeń cyklicznych w wybranych kierunkach płaszczyzny naprężenia (σ_x , τ_{xy}), (2) procesu monotonicznego obciążania. Wartości odkształceń dla obu form procesów deformacyjnych były jednakowe. Bezpośrednio po zakończeniu etapu wstępnego odkształcania przeprowadzono testy mające na celu określenie powierzchni plastyczności materiału z zadaną historią deformacji. Powierzchnię plastyczności w tym przypadku wyznaczono metodą sekwencyjnego nakłuwania powierzchni dla każdej z testowanych próbek.

W pracy wykazano, że przyjęty program obciążeń cyklicznych wywoływał w badanym materiale efekt osłabienia wyrażający się zmniejszeniem wymiarów powierzchni plastyczności materiału po cyklowaniu w stosunku do wielkości powierzchni dla stali w stanie dostawy. Stopień osłabienia badanej stali uzależniony był od kierunku deformacji cyklicznej i osiągał maksymalną wartość na kierunkach pokrywających się z kierunkami cyklowania. Deformacja zadawana w procesie monotonicznego rozciągania, o wartości jednakowej jak w programie cyklicznym, wywoływała większe osłabienie w stosunku do materiału cyklowanego.

1. Wstęp

Postęp w rozwoju nowoczesnych technologii powoduje, że materiały konstrukcyjne stosowane w elementach wielu ważnych urządzeń lub zespołów poddawane są coraz bardziej złożonym cyklom obciążenia i temperatury wywołującym deformację plastyczną. Badania wykazały, że odkształcenie plastyczne metali uzależnione jest od historii obciążania oraz warunków, w jakich jest wywoływane [1-15]. Zachowanie się różnych materiałów podczas odkształcania przy obciążeniu zarówno monotonicznym jak i cyklicznym jest złożone, nawet jeśli zaniedbać efekty związane z prędkością deformacji. Zagadnienie to dodatkowo się komplikuje w przypadku wieloosiowych stanów naprężenia, które są charakterystyczne dla warunków występujących w rzeczywistych elementach konstrukcyjnych, a także w przypadku poddania materiałów wstępnej deformacji plastycznej, co również jest powszechne. Dlatego też jednym z najważniejszych problemów występujących w realnej procedurze projektowania elementów urządzeń jest podanie precyzyjnego opisu deformacji plastycznej w warunkach złożonych obciążeń cyklicznych na podstawie praktycznych modeli matematycznych. Możliwe jest to jednak tylko wówczas, gdy dysponujemy wystarczającym materiałem doświadczalnym.

Aktualnie problemowi wpływu deformacji plastycznej wywoływanej w procesach cyklicznych poświęca się bardzo dużo uwagi w celu lepszego zrozumienia istoty zjawiska oraz sformułowania racjonalnych równań konstytutywnych dla stanów złożonych [14, 15]. Ponieważ dotychczas większość prac doświadczalnych z zakresu plastyczności cyklicznej przeprowadzana była z przyczyn technicznych w stanach jednoosiowych [16, 17, 18], a istniejący materiał doświadczalny w stanach wieloosiowych obciążeń cyklicznych jest niepełny i dosyć jednostronny, zbudowanie rzeczywistych równań narażało wiele trudności. Jednym z kierunków doświadczalnych badań plastyczności, dającym bogaty materiał informacyjny, są badania powierzchni plastyczności w programach monotonicznego i cyklicznego obciążania. Wyniki takich badań stanowią bazę do rozwiązywania

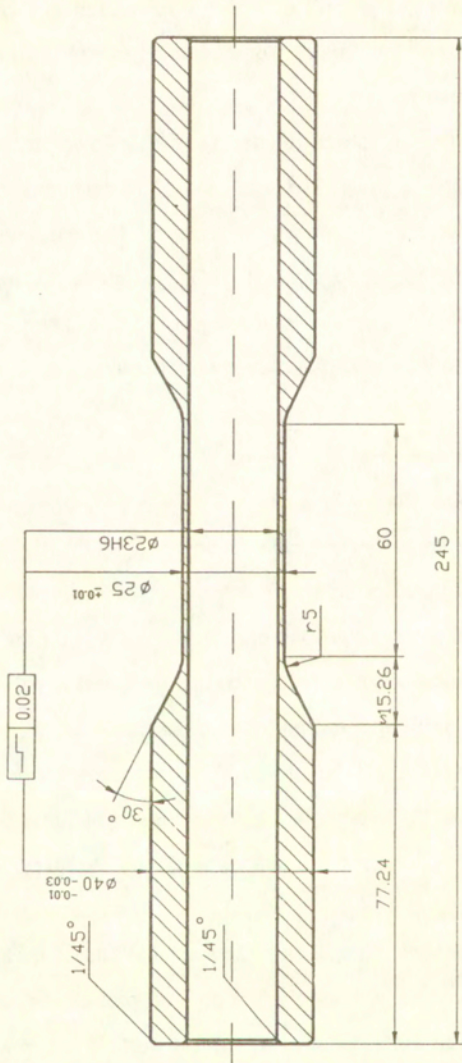
podstawowego problemu teoretycznego, polegającego nie tylko na opisie funkcji plastyczności, ale również na opisie ruchu powierzchni plastyczności poprzez stosownie zdefiniowane parametry umocnienia oraz prawa ewolucji dla wprowadzonych parametrów.

Prezentowana poniżej praca dostarcza stosunkowo szerokiego materiału doświadczalnego, który z racji swojego zakresu daje możliwość weryfikacji dotychczasowych teoretycznych modeli plastyczności. Przedstawiono w niej bowiem badania powierzchni plastyczności dla stali 18G2A w stanie dostawy oraz poddanej wstępnej deformacji w procesie monotonicznego oraz cyklicznego obciążania, które obejmują wszystkie cztery ćwiartki płaszczyzny naprężeń (σ_x, τ_{xy}).

2. Procedura doświadczalna

2.1 Próbką i badany materiał

W badaniach wykorzystywano cienkościennie próbki rurkowe o długości bazy pomiarowej 60 [mm], grubości ścianki 1.0 [mm] i średnicy zewnętrznej w części pomiarowej 25 [mm]. Geometria próbek przedstawiona jest na rys.1. Projekt próbki zapewniał możliwość zamocowywania jej w dwuosiowej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 1343. Starano się dobrać jak najdłuższą część pomiarową próbki w celu redukcji nierównomiernego rozkładu naprężeń na jej długości. Jak wynika bowiem z danych literaturowych [19], wspomniana nierównomierność jest pomijalna dopiero wówczas, gdy stosunek długości pomiarowej do jej średnicy wewnętrznej jest większy od 10. Z uwagi na trudności technologiczne wykonania otworu wewnętrznego, taki stosunek dla próbek rurkowych jest bardzo trudny do uzyskania i stąd większość stosowanych w badaniach tego typu próbek mieści się w granicach 2 do 4 [14, 15, 24], choć znane są rozwiązania gdzie wartość ta jest większa, np. 7.25, [1] lub mniejsza, np. 0.5, [2]. W naszym przypadku stosunek ten wynosił 2.6. W każdym eksperymencie próbka była mocowana częściami chwytowymi w hydraulicznych szczękach maszyny. W celu zabezpieczenia próbki przed zniekształceniem w czasie mocowania w środek próbki, z obu jej stron,



Rys.1 Próbk.

wprowadzano dopasowane trzpienie.

Badaniom poddano stal 18G2A w stanie dostawy, której skład chemiczny zamieszczono w tabeli 1. Jest to stal konstrukcyjna niskostopowa o podwyższonej wytrzymałości, posiadająca strukturę ferrytyczno-perlityczną z niewielką ilością dodatkowych składników stopowych.

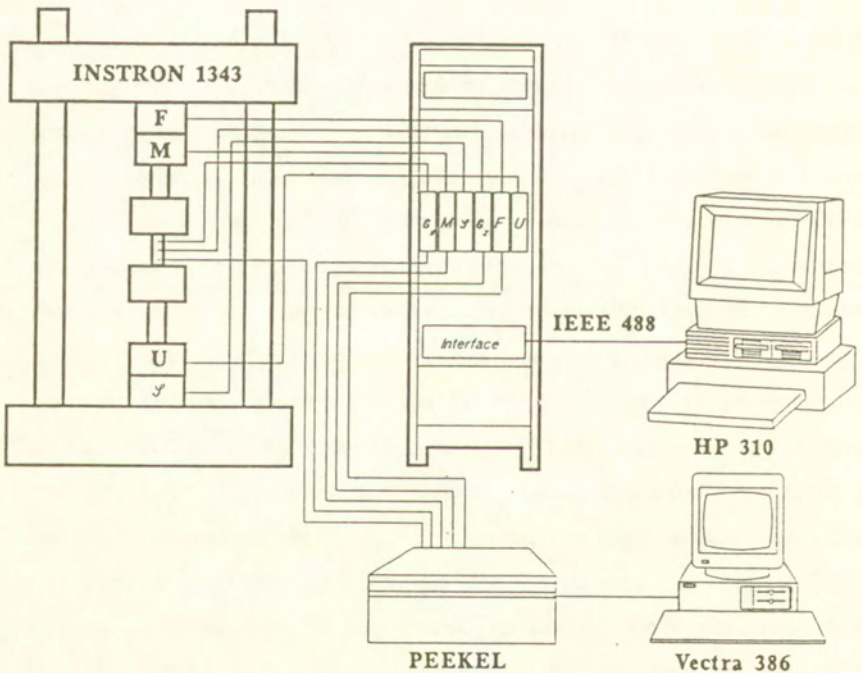
TABELA 1. Skład chemiczny stali 18G2A

material\skł. stopowy	C	Mn	Si	P _{max}	S _{max}
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
18G2A	max 0.2	1.0 - 1.5	max 0.55	0.04	0.04

2.2 Stanowisko badawcze

Badania eksperymentalne przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 1343 umożliwiającej realizację złożonych stanów naprężenia poprzez różne kombinacje siły osiowej i momentu skręcającego. Schemat stanowiska badawczego, na którym realizowano wyznaczanie powierzchni plastyczności ilustruje rys. 2. 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, kontrolowanej przez komputer Hewlett-Packard serii 310. Do wspomnianego komputera doprowadzone są, za pośrednictwem analogowych układów przetwarzających oraz przetwornika analogowo-cyfrowego, sygnały: przemieszczenia osiowego trawersy maszyny, obrotu uchwytu mocującego próbkę, siły osiowej, momentu skręcającego, odkształceń osiowych oraz odkształceń postaciowych. Opracowane oprogramowanie umożliwiała obciążanie próbek z zadaną prędkością dla każdej składowej odkształcenia z zachowaniem ich stałego stosunku aż do chwili osiągnięcia wymaganej wartości intensywności odkształcenia plastycznego. Opisywane

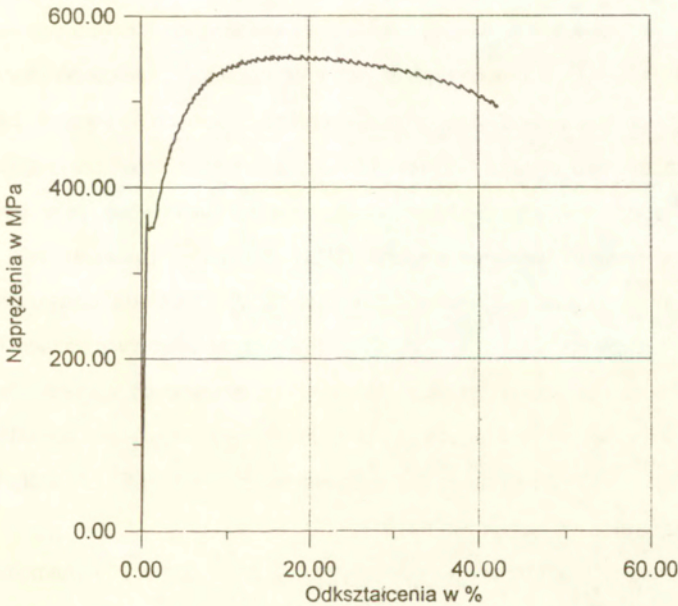
stanowisko badawcze wyposażone było w dwa niezależne układy akwizycji i gromadzenia danych pomiarowych. Pierwszy z nich związany jest z komputerem sterującym i stąd ma ograniczone możliwości przedstawiania aktualnego stanu wykonania eksperymentu. Natomiast drugi układ pracuje niezależnie od komputera sterującego. Integralną częścią tego układu jest wielokanałowy system pomiarowy firmy PEEKEL, który dzięki sprzęgnięciu z komputerem firmy Hewlett-Packard typu Vectra 386 zapewniał możliwość obserwowania wyników pomiarów w trybie "on line" oraz ich rejestrację dla wszystkich wykorzystywanych kanałów w przeprowadzanym aktualnie teście.



Rys.2 Schemat stanowiska badawczego.

2.3 Wyniki badań podstawowych parametrów mechanicznych

Parametry mechaniczne badanego materiału określono na podstawie statycznej próby rozciągania wykonanej na maszynie wytrzymałościowej Instron w temperaturze pokojowej, przy prędkości przemieszczenia trawersy wynoszącej 0.5 [mm/min]. Na podstawie wyników testu, rys. 3, wyznaczono moduł Younga ($E=2.3 \times 10^5$ [N/mm²]), górną granicę plastyczności ($R_g=380$ [N/mm²]), dolną granicę plastyczności ($R_d=345$ [N/mm²]), granicę wytrzymałości doraźnej ($R_m=550$ [N/mm²]) oraz ciągliwość (43 [%]).



Rys.3 Charakterystyka jednoosiowego rozciągania stali 18G2A.

2.4 Pomiar odkształceń i obciążeń

Wyznaczanie powierzchni plastyczności przeprowadzano przy wykorzystaniu układów tensometrycznych naklejanych na powierzchni próbek. Odształcenia 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. Układy do pomiaru odkształceń osiowych i postaciowych podłączone były do systemu pomiarowego maszyny Instron 1343. Każdorazowo przed przystąpieniem do badań wspomniane układy tensometryczne były kalibrowane przy pomocy precyzyjnego mostka tensometrycznego UGR 60 firmy Hottinger tak, aby maksymalnemu sygnałowi sterowania o wartości 10 [V] odpowiadało odkształcenie 0.8 [%]. Przy rozdzielczości układu pomiarowego maszyny Instron wynoszącej 0.001 [V], rozdzielczość pomiaru odkształceń osiowych i postaciowych wynosiła 8×10^{-6} . Natomiast półmostkowy układ tensometryczny do pomiaru odkształceń obwodowych podłączony był bezpośrednio do systemu pomiarowego firmy PEEKEL, który także zapewniał rozdzielczość pomiarową 8×10^{-6} .

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

2.5 Opis programu badań

Procedura doświadczalna składała się z kilku etapów. W pierwszym przeprowadzono wyznaczenie pierwotnej powierzchni plastyczności materiału w stanie dostawy, tj. bez żadnej obróbki cieplnej. W literaturze można znaleźć wiele metod wyznaczania powierzchni plastyczności [20, 21, 22, 23, 24]. Spośród częściściej stosowanych można wymienić:

- a) metodę z użyciem wielu próbek, w której każdy punkt powierzchni reprezentujący określony stan naprężenia wyznaczany jest na jednej próbce,
- b) metodę sekwencyjną z wykorzystaniem jednej próbki poprzez kolejne jej obciążanie w celu uzyskania żądanego odkształcenia trwałego (tzw. offsetu) dla kolejnych kierunków określonych w płaszczyźnie naprężeń (σ_x , τ_{xy}) przeciwnie lub zgodnie z ruchem wskazówek zegara,

Zgodnie z obserwacjami uzyskanymi w pracach eksperymentalnych, najlepsze wyniki jakościowe daje metoda wyznaczania powierzchni plastyczności z wykorzystaniem wielu próbek, ponieważ obraz tak otrzymanej powierzchni nie jest zakłócony przez historię kolejnych nakładów wykonywanych w celu wyznaczenia powierzchni przy użyciu jednej próbki. Przeprowadzone badania [23] wykazały jednak, że można także uzyskać reprezentatywne wyniki stosując metodę b), która ma tę zaletę, iż jest znacznie tańsza i dużo mniej pracochłonna w stosunku do metody a). W niniejszej pracy do wyznaczenia powierzchni plastyczności wykorzystywano obie wymienione metody, przy czym sposób a) stosowano do otrzymania powierzchni pierwotnej, natomiast b) do otrzymania powierzchni po cyklach.

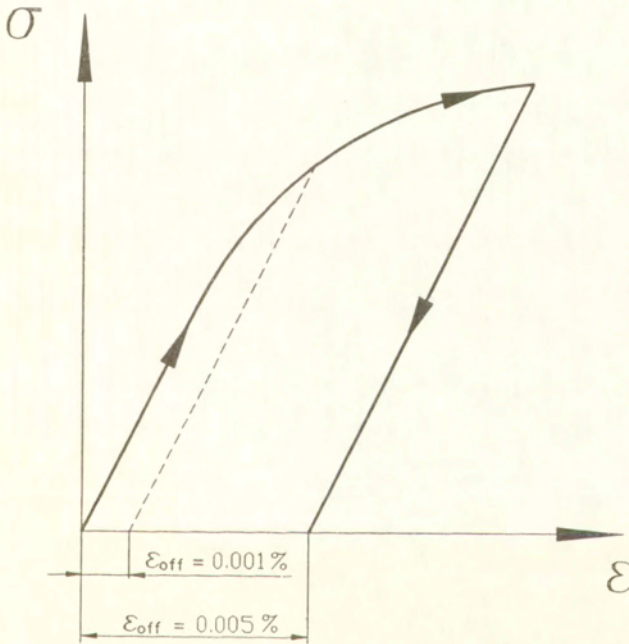
W celu wyznaczenia pierwotnej powierzchni plastyczności przygotowano 8 jednakowych próbek, z których każdą obciążano przy innym stosunku dwóch składowych obciążenia tak, aby uzyskać równomiernie rozłożone punkty doświadczalne w całej płaszczyźnie naprężeń (σ_x , τ_{xy}). Metodę tę wykorzystywano jedynie do otrzymania powierzchni początkowej, ponieważ sposób sekwencyjny był,

dla badanego materialu w stanie dostawy, nieprzydatny. Spowodowane bylo to faktem, ze krzywa rozciagania stali 18G2A w stanie dostawy zawiera przystanek plastycznosci, ktory utrudnia sterowanie maszyną wytrzymałościową w tym zakresie, a tym samym uzyskanie zadanego "offsetu" odkształceń. Problemu tego nie bylo po programie cyklicznych obciążení, po którym krzywe naprężenie - odkształcenie stawaly się gladtke i stąd dla materialu zdeformowanego w procesie cyklowania do wyznaczenia powierzchni przyjmowano duzo prostszą sekwencyjną metodę kolejnych obciążení jednej próbki.

Jednym z wazniejszych zagadnień przy wyznaczaniu punktów powierzchni plastycznosci jest definicja granicy plastycznosci, poniewaz jej wartosc decyduje o ksztalcie i wymiarach powierzchni [25]. W niniejszych badaniach procedura wyznaczania punktu powierzchni plastycznosci na danej próbce realizowana byla na podstawie oprogramowania przystosowanego do wspolpracy z interfejsem maszyny Instron. Zgodnie z nim w pocztkowej fazie obciążania próbki obliczany byl modul sprężystosci. Obliczenia te przeprowadzano na podstawie punktów doświadczalnych zebranych w ustalonym wczesniej przedziale wartosci naprężeń. Proces obciążania próbki byl zatrzymywany w chwili, gdy różnica intensywnosci odkształceń calkowitych i intensywnosci odkształceń sprężystych, obliczonych jako iloraz intensywnosci naprężeń i wyznaczonego wczesniej modulu Younga, przekraczala zadaną wartosc (wartosc ta wynosila 0.005 [%]). Po spelnieniu tego warunku nastepowala zmiana sposobu sterowania maszyną z odkształceń na sterowanie obciążeniami i nastepowal proces odciążania do zerowej wartosci sily i momentu skręcającego. Schematyczną ilustrację procesu obciążania próbki do zadaney wartosci intensywnosci odkształcenia a nastepnie odciążania przedstawiono na rys.4.

Bezpośrednio po nakluciu kazda z próbek podlegala obciążaniu cyklicznemu zgodnie z programem zamieszczonym na rys.5. Program obciążení cyklicznych podzielony byl na dwa etapy:

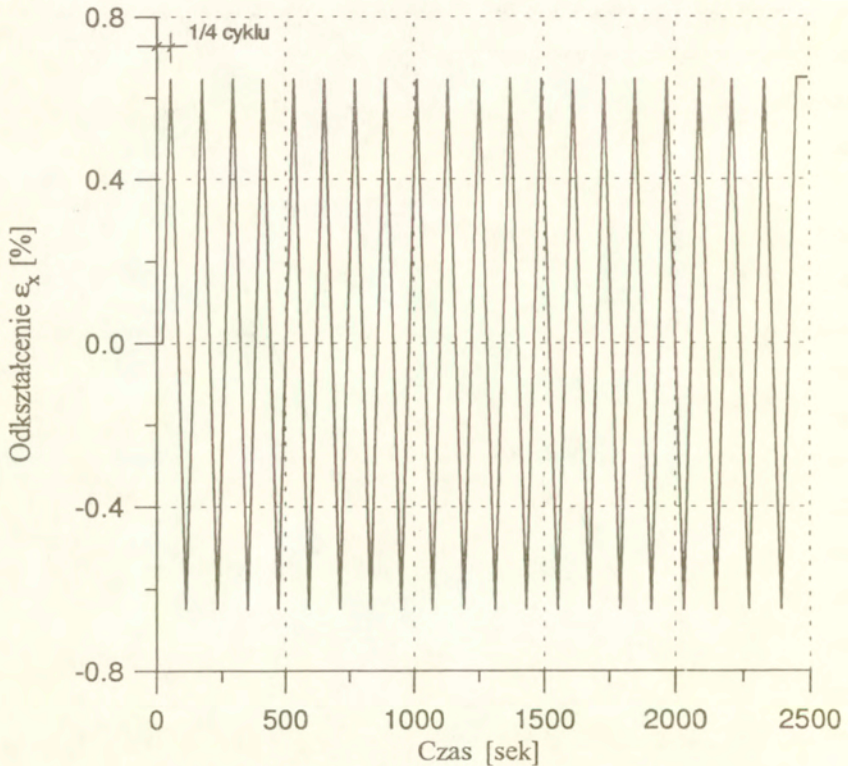
- a) cyklowanie przy stałej amplitudzie odkształceń całkowitych $\Delta\varepsilon=\pm 0.65$ [%],
prowadzone przy prędkości odkształcenia $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^{-4}$ [1/s],
b) cyklowanie przy malejącej amplitudzie odkształceń od wartości $\Delta\varepsilon=\pm 0.65$ [%]
do $\Delta\varepsilon=\pm 0$ [%] przy prędkości odkształcenia malejącej w każdym cyklu ze
względu na obniżanie wartości amplitudy.



Rys.4 Program obciążania próbki przy pojedynczym nakłuciu (linią przerywaną zaznaczono sposób otrzymywania dodatkowo rozpatrywanego offsetu).

Program cykli stałych zawierał 81 ćwiartek, rys. 5a, i miał na celu doprowadzić do cyklu ustalonego, tj. zamkniętego przebiegu zmian stanu naprężenia nie

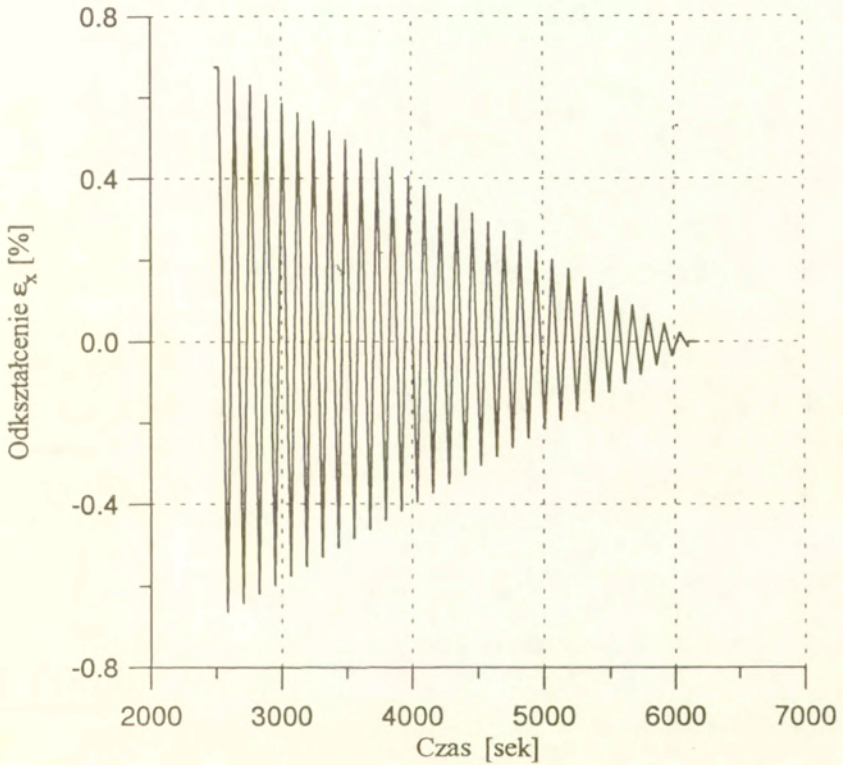
wykazującego przyrostów względnie spadków naprężenia w całym cyklu w stosunku do pętli cykli poprzedzających.



Rys.5a Program obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie realizowany dla każdego z ośmiu przyjętych kierunków.

Program cykli malejących zawierał 60 półcykli, rys. 5b i realizowany był natychmiast po zakończeniu cykli stałych. Celem tego etapu było uzyskanie krzywej szkieletowej dla badanego materiału, co jest przedmiotem oddzielnej pracy [26]. Wspomniana krzywa w niniejszym programie badań stanowi zbiór punktów uzyskanych z

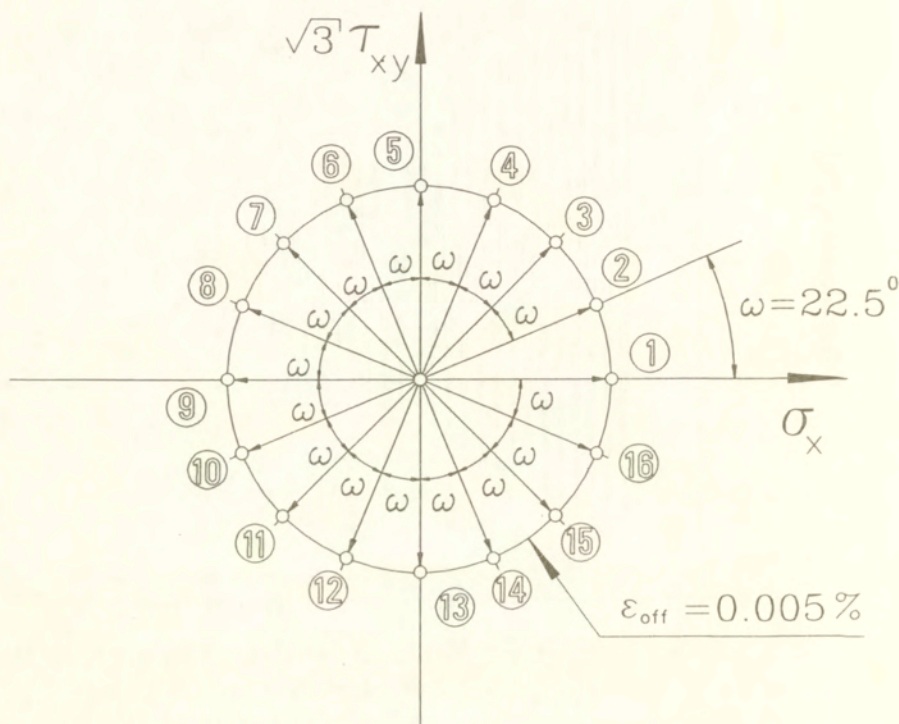
odczytania wartości intensywności naprężenia i intensywności odkształcenia, odpowiadających ich wartościom maksymalnym w danym cyklu, a zatem uzyskiwana była z 30 punktów.



Rys.5b Program obciążeń cyklicznych o malejącej amplitudzie realizowany dla każdego z ośmiu przyjętych kierunków (skala czasu jest kontynuacją skali pokazanej na rys. 5a).

Po wykonaniu programu obciążeń cyklicznych wyznaczano powierzchnię plastyczności wykorzystując metodę sekwencyjną. W tym przypadku procedura określania powierzchni polegała na wyznaczeniu 16 punktów leżących na proporcjonalnych drogach obciążania, realizowanych przy sterowaniu

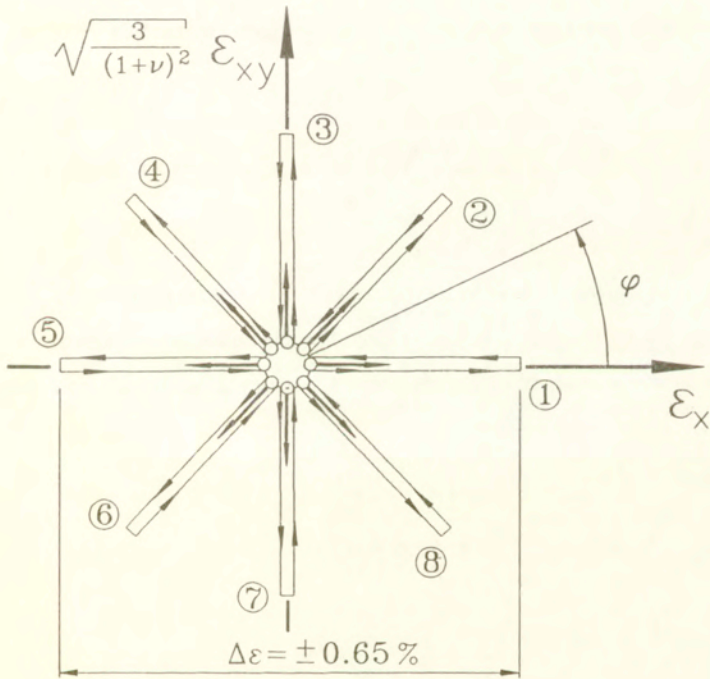
odkształceniem. Sposób określania offsetu schematycznie pokazano na rys.4, natomiast pełny obraz procesu nakluwania powierzchni w przestrzeni naprężeń zamieszczono na rys.6. Numery od 1 do 16 odpowiadają kolejnym obciążeniom próbki do wartości intensywności odkształcenia 0.005 [%].



Rys.6 Program sekwencyjnego wyznaczania powierzchni plastyczności na jednej próbce.

Powyższa procedura opisuje sposób sekwencyjnego nakluwania powierzchni plastyczności na jednej próbce i wynik ten odpowiada jednemu kierunkowi wstępnej deformacji zadawanej drogą obciążeń cyklicznych. Jak już wspomniano,

testom poddano 8 próbek, przy czym każda z nich obciążana była przy innym stosunku siły osiowej i momentu skręcającego. Drogi obciążania realizowano przy sterowaniu odkształceniem i dlatego w dwuwymiarowej przestrzeni odkształceń $(\epsilon_x, \sqrt{\frac{3}{1+\nu^2}} \epsilon_{xy})$ punkty reprezentujące wywoływane stany naprężenia odpowiadały kierunkom $\varphi=0^\circ; 45^\circ; 90^\circ; 135^\circ; 180^\circ; 225^\circ; 270^\circ$ i 315° , rys. 7. Na rysunku tym niezależne strzałki oznaczają kierunek wstępnego nakłucia w celu otrzymania punktu powierzchni plastyczności oraz wskazują kierunek, od którego rozpoczynało się cyklowanie.



Rys.7 Schemat pełnego programu testów przy obciążeniach cyklicznych.

Ostatni etap programu obejmował wykonanie testu, w którym deformację wstępną wprowadzano drogą monotonicznego obciążania próbki do wartości

odkształceń całkowitych równych 0.65%, podobnie jak przy próbach z obciążeniami cyklicznymi. Eksperyment wykonywany był na maszynie wytrzymałościowej Instron i polegał na rozciągnięciu próbki do zadanej wartości odkształcenia, odciążeniu a następnie wyznaczeniu powierzchni plastyczności metodą sekwencyjną na jednej próbce, analogicznie jak to opisano powyżej.

2.6 Zależności definiujące stan naprężenia i stan odkształcenia

Składowe stanu naprężenia zdefiniowano zgodnie z powszechnie stosowanymi wzorami dla powłok cienkościennych w odniesieniu do początkowych wymiarów próbki. Tak więc naprężenie osiowe wyrażono zależnością

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

gdzie:

F - siła osiowa,

D_0 - początkowa średnica zewnętrzna próbki na bazie pomiarowej,

d_0 - początkowa średnica wewnętrzna próbki na bazie pomiarowej,

natomiast naprężenie styczne, odniesione do średnicy zewnętrznej, następującym związkiem

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

gdzie

M_s - moment skręcający próbkę.

Wartość intensywności naprężenia wyrażono zależnością

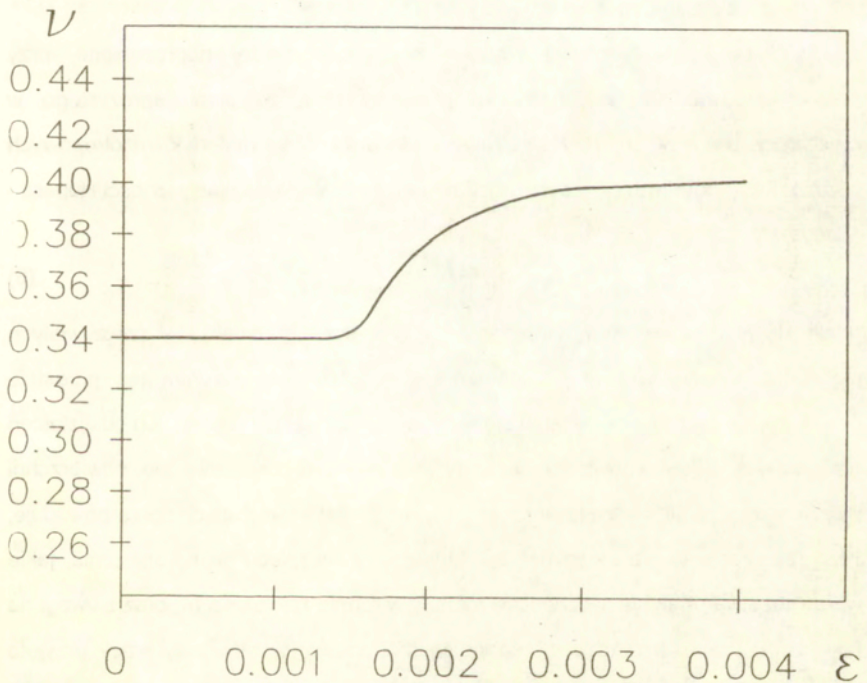
$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2}, \quad (3)$$

natomiast wartości intensywności odkształcenia zdefiniowano związkiem uwzględniającym współczynnik Poissona ν

$$\epsilon_i = \sqrt{\epsilon_x^2 + \frac{3}{(1+\nu)^2} \cdot \epsilon_{xy}^2}, \quad (4)$$

gdzie: ϵ_{11} - odkształcenie osiowe

$\epsilon_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2}$ - odkształcenie postaciowe.



Rys.8 Wykres zależności współczynnika Poissona od wielkości deformacji przy jednoosiowym rozciąganiu.

W przypadku $\nu=0.5$ równanie to przyjmuje postać

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \frac{4}{3}\varepsilon_{xy}^2}. \quad (5)$$

Dla badanej stali, w zakresie odkształceń, dla których wyznaczano powierzchnię plastyczności, współczynnik Poissona wynosił 0.34, rys. 8 i do obliczeń intensywności odkształcenia wykorzystywano wzór (4).

2.7 Warunek plastyczności

Warunek plastyczności stanowi związek pomiędzy naprężeniami, przy pomocy którego możemy opisywać przejście ciała ze stanu sprężystego w plastyczny. Jak wykazuje wiele publikacji, dla dużej ilości materiałów izotropowych bardzo dobre potwierdzenie doświadczalne posiada warunek plastyczności Hubera - Misesa w postaci

$$S_{ij}S_{ij} = K^2, \quad (6)$$

gdzie S_{ij} jest dewiatorem naprężenia, a K - stałą materiału. W rzeczywistych metalach, ze względu na wzmocnienie lub osłabienie, warunek ten przestaje obowiązywać zaraz po pojawieniu się w procesie obciążania pierwszych odkształceń plastycznych. Zjawisko wzmocnienia wskazuje na rozszerzanie się powierzchni plastyczności zdefiniowanej związkiem (6), natomiast efekt Bauschingera powoduje, że rozszerzanie to nie może być symetryczne. Ze względu na ograniczenia, jakie wprowadza warunek plastyczności wyrażony w formie zależności (6) oraz z uwagi na fakt, że w praktyce rzadko materiały są izotropowe, w niniejszej pracy przyjęto anizotropowy warunek plastyczności, którego ogólna postać podana przez Misesa [27], przy założeniu braku wpływu ciśnienia hydrostatycznego na uplastycznienie i z uwzględnieniem liniowych członów od wszystkich składowych naprężeń, przyjmuje następującą formę [28]:

$$F(\sigma_{ij}) = k_{12}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + k_{23}(\sigma_y - \sigma_z)^2 + k_{31}(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 2\tau_{xy}[k_{16}(\sigma_x - \sigma_x) + k_{26}(\sigma_z - \sigma_y)] + \\ + 2\tau_{yz}[k_{24}(\sigma_x - \sigma_y) + k_{34}(\sigma_x - \sigma_z)] + 2\tau_{zx}[k_{35}(\sigma_y - \sigma_z) + k_{15}(\sigma_y - \sigma_x)] + k_{44}\tau_{yz}^2 + k_{55}\tau_{zx}^2 (7) \\ + k_{66}\tau_{xy}^2 - h_{12}(\sigma_x - \sigma_y) - h_{23}(\sigma_y - \sigma_z) - h_{31}(\sigma_z - \sigma_x) + h_{44}\tau_{yz} + h_{55}\tau_{zx} + h_{66}\tau_{xy} = 1$$

Warunek ten, w przypadku płaskiego stanu naprężenia realizowanego w prezentowanych badaniach, tj. gdy tylko $\sigma_x \neq 0$ i $\tau_{xy} \neq 0$, natomiast pozostałe składowe naprężeń równają się 0, upraszcza się do postaci

$$F(\sigma_{ij}) = (k_{12} + k_{31})\sigma_x^2 - 2k_{16}\sigma_x\tau_{xy} + k_{66}\tau_{xy}^2 + \\ (h_{31} - h_{12})\sigma_x + h_{66}\tau_{xy} = 1 \quad (8)$$

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

$$k_{12} + k_{31} = \frac{1}{Y_x Z_x}, \quad h_{31} - h_{12} = \frac{1}{Y_x} - \frac{1}{Z_x}, \\ k_{66} = \frac{1}{R_{xy} P_{xy}}, \quad h_{66} = \frac{1}{R_{xy}} - \frac{1}{P_{xy}}, \quad (9)$$

gdzie: Y_x - granica plastyczności przy rozciąganiu, Z_x - wartość bezwzględna granicy plastyczności przy ściskaniu, R_{xy} - granica plastyczności przy ścinaniu uzyskana dla dodatnich naprężeń τ_{xy} , P_{xy} - wartość bezwzględna granicy plastyczności przy ścinaniu uzyskana dla ujemnych naprężeń τ_{xy} . Jedyne współczynnik k_{16} 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 (8) przyjmuje postać

$$F(\sigma_{ij}) = \frac{1}{Y_x Z_x} \sigma_x^2 - 2k_{16} \sigma_x \tau_{xy} + \frac{1}{R_{xy} P_{xy}} \tau_{xy}^2 + \left(\frac{1}{Y_x} - \frac{1}{Z_x} \right) \sigma_x + \left(\frac{1}{R_{xy}} - \frac{1}{P_{xy}} \right) \tau_{xy} = 1. \quad (10)$$

W pracy wykorzystywano to równanie w nieco wygodniejszej następującej formie

$$F(\sigma_{ij}) = A\sigma_x^2 + 2B\sigma_x\tau_{xy} + C\tau_{xy}^2 + 2D\sigma_x + 2E\tau_{xy} = 1, \quad (11)$$

do aproksymacji punktów doświadczalnych, odpowiadających przyjętej definicji granicy plastyczności. Procedura obliczeń polegała na wyznaczeniu współczynników anizotropii dla punktów doświadczalnych reprezentujących daną granicę plastyczności tak, aby suma kwadratów odległości punktów eksperymentalnych od krzywej aproksymacji (11) osiągała minimum. Przyjęty warunek plastyczności umożliwiał określenie zmian wymiarów osi elipsy stanowiącej powierzchnię plastyczności, położenia jej środka, obrotu względem przyjętego układu współrzędnych, a także dał możliwość opisanie efektu Bauschingera.

3. Wyniki badań

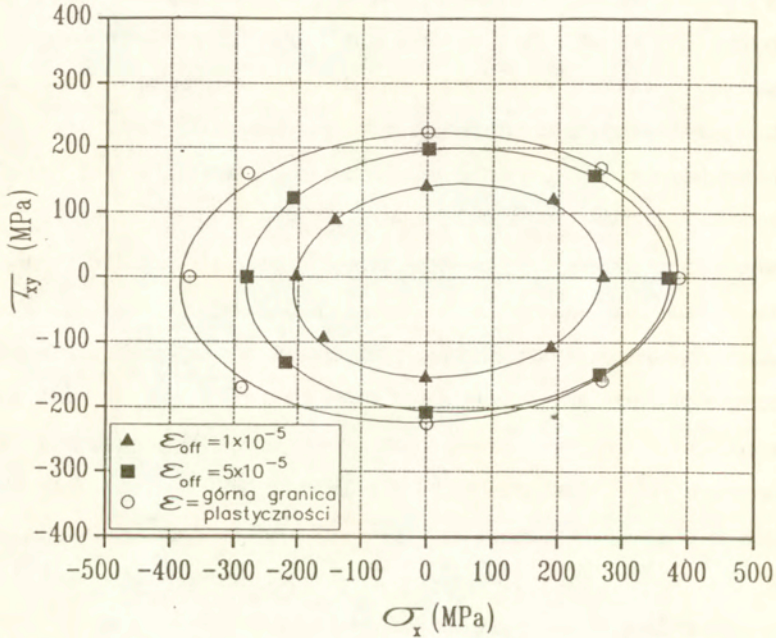
3.1 Wyniki dla materiału w stanie dostawy

Dla badanej stali 18G2A w stanie dostawy, w celu określenia początkowej powierzchni plastyczności, przeprowadzono monotoniczne obciążanie próbek wzdłuż ośmiu różnych dróg proporcjonalnych w przestrzeni naprężeń (σ_x , τ_{xy}) do wartości intensywności odkształceń plastycznych 0.005 [%]. Efektem tych testów było uzyskanie, dla każdego rozpatrywanego kierunku, przebiegu intensywności naprężeń jako funkcji intensywności odkształceń całkowitych będących sumą intensywności odkształceń sprężystych i plastycznych. Po zastosowaniu procedury filtrowania wyników, wykonywanej w celu wyeliminowania efektów geometrycznych związanych z układem próbka - uchwyty maszyny opisanymi szczegółowo w pracy [23], uzyskano odseparowanie odkształceń sprężystych od plastycznych i w efekcie przebiegi intensywności odkształceń plastycznych jako funkcji intensywności naprężeń. Tak uzyskane wykresy aproksymowano krzywymi wykładniczymi postaci

$$\sigma_i = C \cdot (\varepsilon_i^{(p)})^n, \quad (12)$$

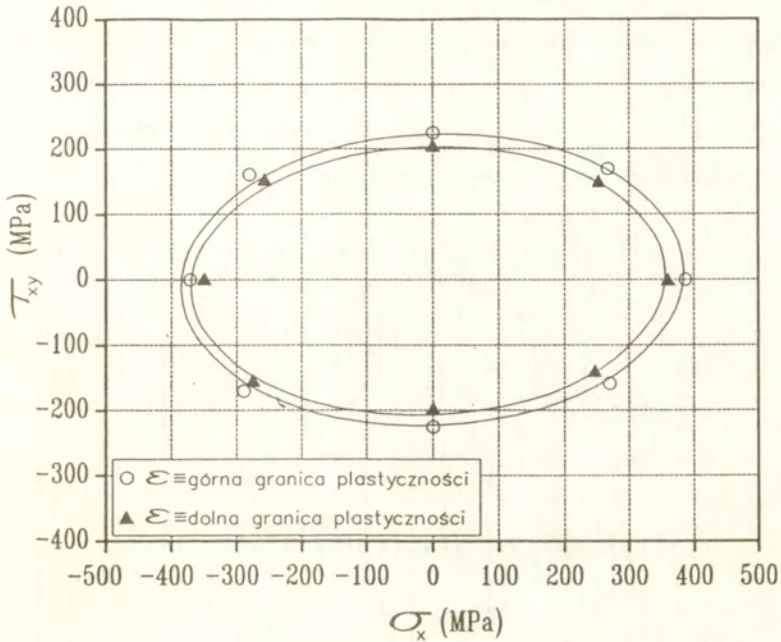
gdzie C, n - stałe. Na podstawie krzywych odpowiadających różnym proporcjonalnym drogom obciążania określano punkty powierzchni plastyczności dla danej definicji granicy plastyczności (przy danej granicy dla jednej krzywej uzyskiwano jeden punkt powierzchni). W ten sposób otrzymane punkty przybliżano równaniem elipsy reprezentującym warunek plastyczności w postaci (11) tak, aby suma kwadratów odległości punktów doświadczalnych od krzywej aproksymacji osiągała minimum. Na rys. 9 przedstawiono tak uzyskane początkowe powierzchnie plastyczności dla dwóch definicji granicy plastyczności $\epsilon_{\text{off}}=10^{-5}$ i $\epsilon_{\text{off}}=5 \times 10^{-5}$. Pierwsza z nich stanowi granicę pośrednią, przyjętą w celu przeanalizowania własności materiału w zakresie stosunkowo małego odkształcenia plastycznego, natomiast druga odpowiada największemu odkształceniu plastycznemu w zrealizowanych testach wyznaczania powierzchni plastyczności. Z wykresów tych wynika, że materiał w stanie dostawy wykazuje pewną anizotropię własności, wyrażającą się przesunięciem zarysu powierzchni w kierunku rozciągania. Istnienia anizotropii własności mechanicznych badanej stali dla danej definicji offsetu nie potwierdziły jednak obserwacje górnej i dolnej granicy plastyczności dokonane przez pociągnięcie próbek do większych wartości odkształcenia plastycznego. Na rys. 10 przedstawiono powierzchnie odpowiadające górnej i dolnej granicy plastyczności, odczytane z wykresów intensywności odkształcenia w funkcji intensywności naprężenia dla każdego z ośmiu rozpatrywanych kierunków. Jak widać, powierzchnie te są niemal współśrodkowe i nie wykazują cech anizotropii materiału. Należy jednak pamiętać, że dla każdego kierunku zarówno górna jak i dolna granica plastyczności odpowiadają różnym odkształceniom plastycznym. Pomimo tego na rys.9 porównano powierzchnię odpowiadającą górnej granicy plastyczności z powierzchniami dla przyjętych definicji offsetów. Jak widać, powierzchnia dla $\epsilon_{\text{off}}=5 \times 10^{-5}$ jest w części rozciągania niemal styczna z powierzchnią odpowiadającą górnej granicy plastyczności, natomiast w części ściskania wymiar jej jest znacząco mniejszy. To wzajemne ułożenie wymienionych powierzchni wskazuje na pewien

szczególny rodzaj anizotropii badanej stali, uwidocznionej dla konkretnych definicji offsetu.



Rys.9 Powierzchnie plastyczności wyznaczone na ośmiu próbkach dla dwóch różnych definicji granicy plastyczności, na tle powierzchni odpowiadającej górnym granicom plastyczności.

Z drugiej jednak strony granice plastyczności górna, a zwłaszcza dolna, są własnościami materiału o charakterze fizycznym i dla obu tych wielkości ich wartości wyrażone w intensywności naprężenia są z dużą dokładnością jednakowe dla wszystkich testowanych kierunków, pomimo że obie granice plastyczności dla poszczególnych kierunków osiągnano dla różnych wielkości intensywności odkształcenia plastycznego. Reasumując można powiedzieć, że badana stal jest izotropowa w sensie wartości górnej i dolnej granicy plastyczności, natomiast dojsię



Rys.10 Powierzchnie odpowiadające górnym i dolnym granicom plastyczności określone na podstawie badań dla ośmiu różnych kierunków obciążenia.

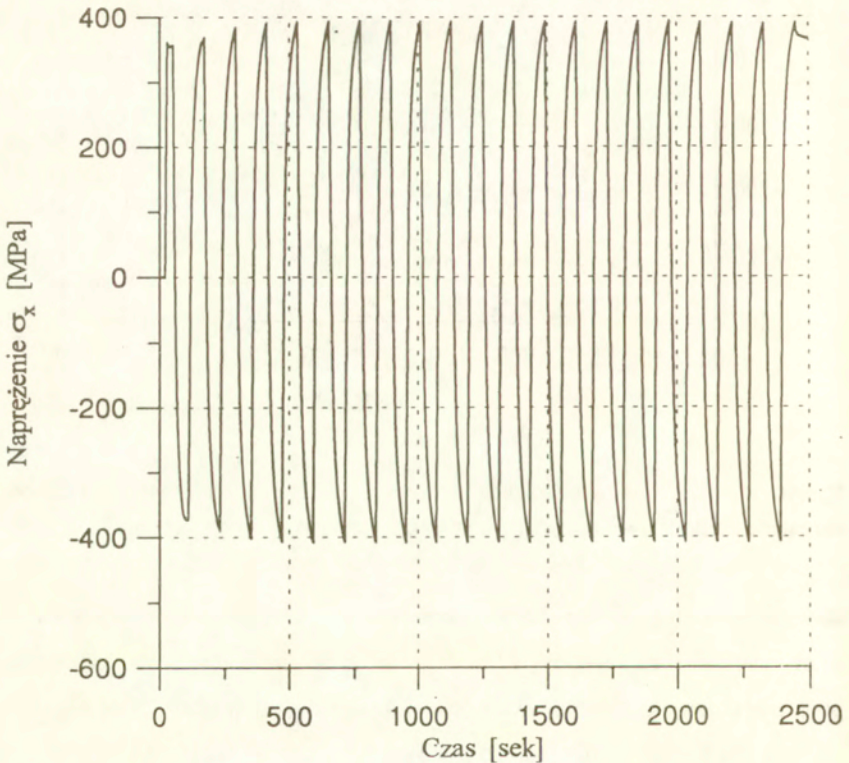
do wymienionych granic ma charakter anizotropowy, który jednak ujawnia się dopiero poza zakresem sprężystym. Wynika to z zestawienia modułów sprężystości podłużnej dla każdego rozpatrywanego kierunku podanych w tabeli 2. Jak widać, ich wartości dla kierunków rozciąganie i ściskanie są prawie jednakowe, a zatem nie wykazują wyraźnych różnic w przebiegu dojścia do górnej i dolnej granicy plastyczności dla tych kierunków.

Tabela 2. Moduły sprężystości podłużnej stali 18G2A w stanie dostawy

φ [deg]	0	45	90	135	180	225	270	315
E_i [GPa]	216	228	238	230	217	229	238	229

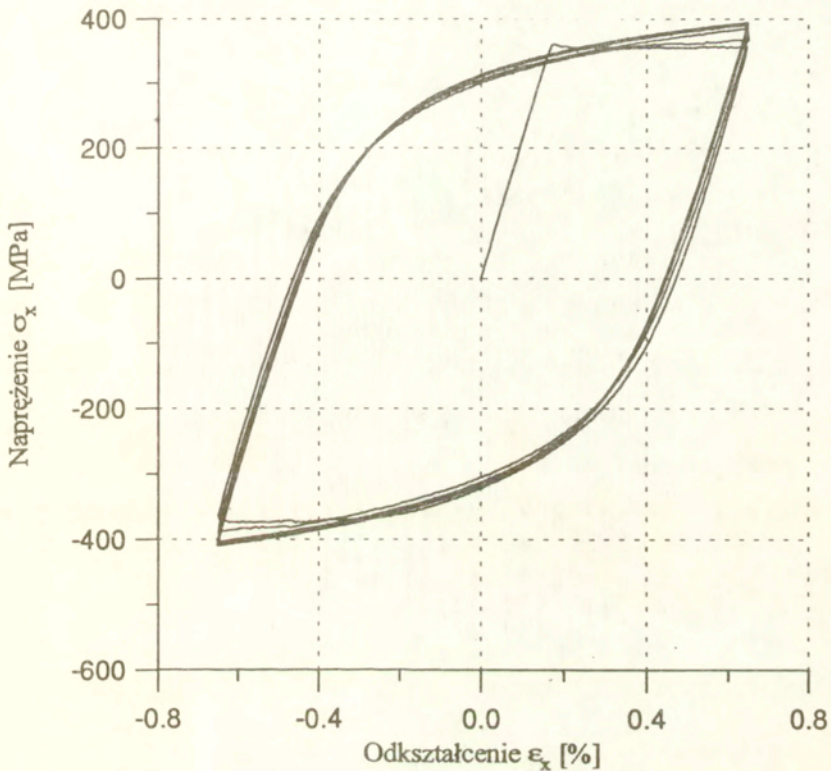
3.2 Wyniki dla materiału po cyklowaniu

Deformacja cykliczna prowadzona była najpierw przy stałej amplitudzie $\Delta\epsilon=\pm 0.65$ [%] do momentu osiągnięcia cyklu ustalonego. Przykładowy przebieg, w funkcji czasu, naprężeniowej odpowiedzi materiału na zadaną deformację według programu zamieszczonego na rys. 5a ilustruje rys.11.



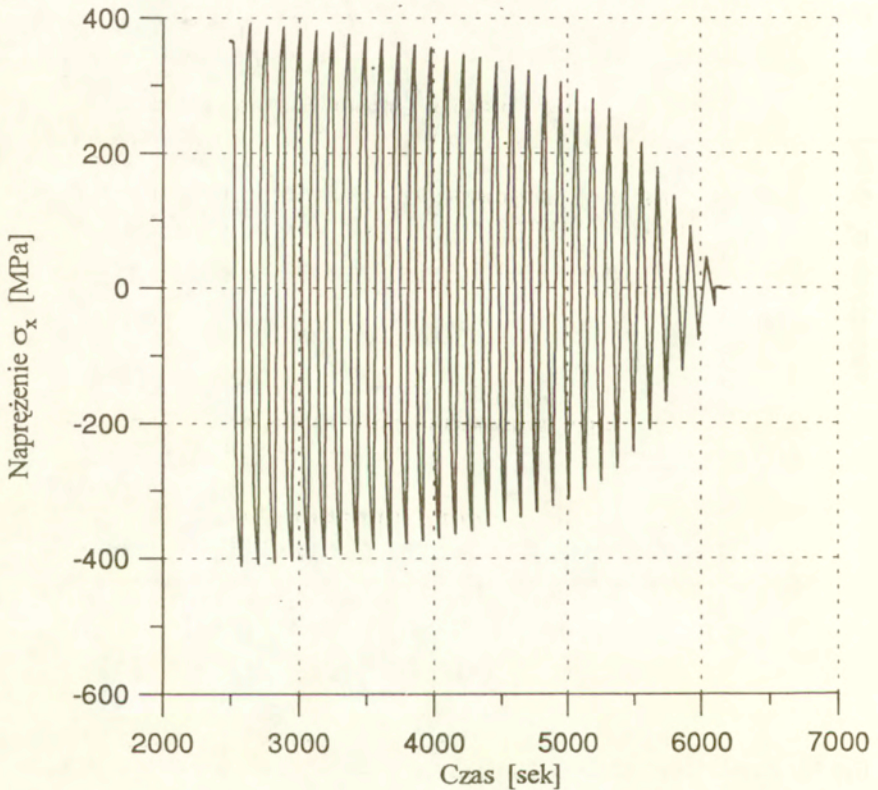
Rys.11 Przykładowa odpowiedź materiału, w naprężeniach jako funkcji czasu, na sterowany w odkształceniach program cykli o stałej amplitudzie, pokazany na rys.5a.

Rys.12 przedstawia te same rezultaty w płaszczyźnie naprężenie - odkształcenie. Jak widać, dojście do zamkniętego cyklu ustalonego następowało stosunkowo



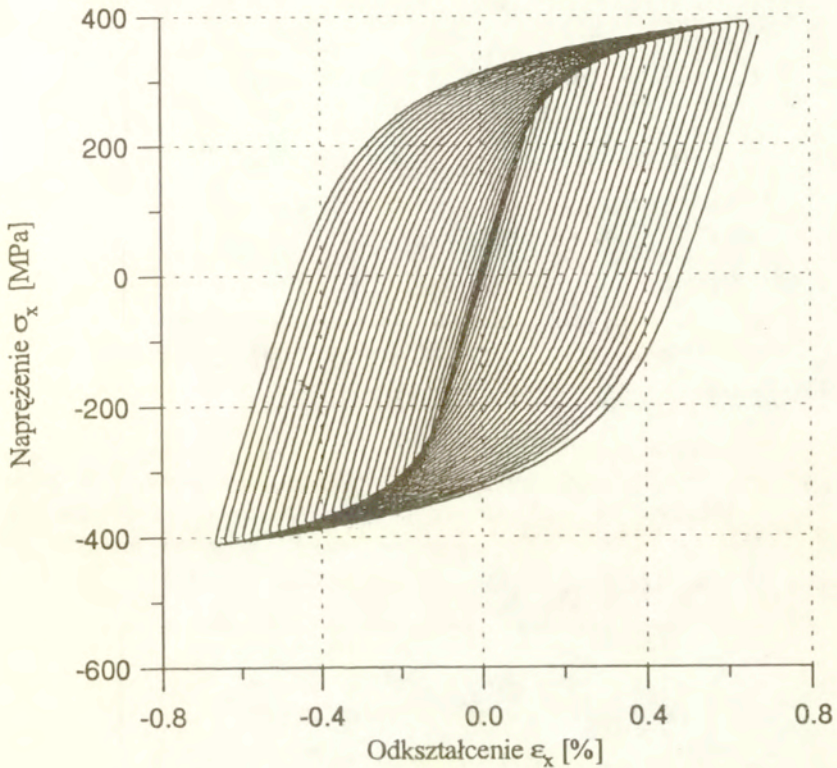
Rys.12 Przykładowy przebieg całego programu obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie dla jednego kierunku (0°) wyrażony w postaci wykresu zmian naprężenia w funkcji odkształcenia (widoczna pętla cyklu ustalonego).

szybko i w zasadzie zostawał on osiągnany po 5 cyklach. Po wykonaniu programu cykli o stałej amplitudzie następowało automatyczne przejście do realizacji programu cykli malejących (rys. 5b), dla których przykładowa odpowiedź naprężeniowa materiału pokazana jest na rys.13., natomiast na rys.14 przedstawiono te same



Rys.13 Przykładowa odpowiedź materiału, w naprężeniach jako funkcji czasu, na sterowany w odkształceniach program. cykli o malejącej amplitudzie pokazany na rys.5b (skala czasu jest kontynuacją skali pokazanej na rys. 11).

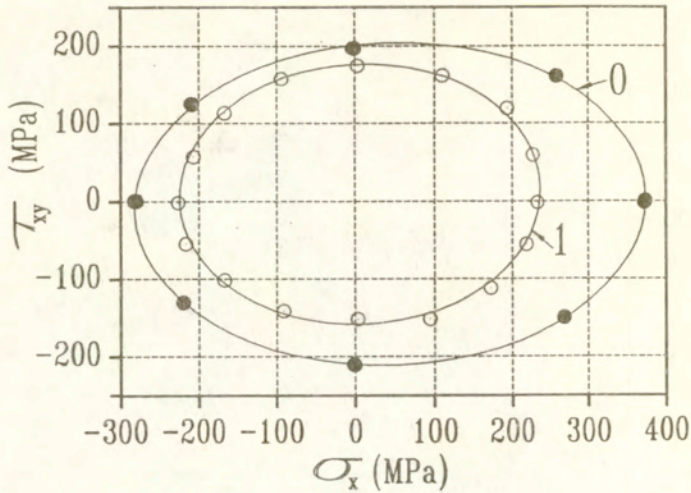
rezultaty w płaszczyźnie naprężenie - odkształcenie. Rysunek ten stanowi ilustrację jednej z metod otrzymywania krzywej szkieletowej, będącej w tym przypadku zbiorem punktów wierzchołkowych dla całego programu cykli malejących.



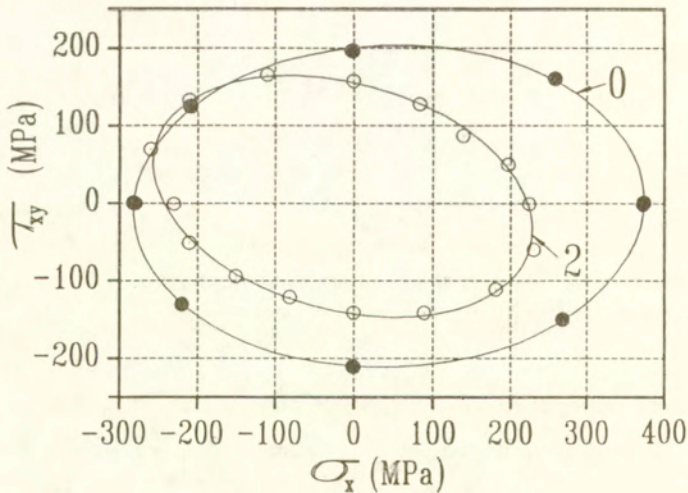
Rys.14 Przykładowy przebieg całego programu obciążeń cyklicznych o malejącej amplitudzie dla jednego kierunku, wyrażony w postaci wykresu zmian naprężenia w funkcji odkształcenia. Widoczna krzywa szkieletowa, będąca obrazem punktów wierzchołkowych przy przejściu z obciążania do odciążania.

Zamieszczone przykładowe wyniki z cyklowań dotyczą próby oznaczonej na rys. 7 numerem 1, dla której rozpoczynanie cyklowania odbywało się od kierunku rozciągania.

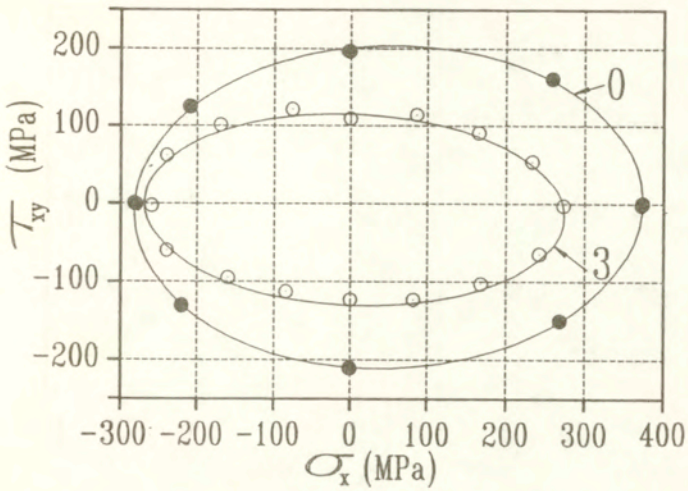
Po tak wykonanym programie obciążeń cyklicznych, dla każdego rozpatrywanego kierunku wyznaczono powierzchnię plastyczności metodą sekwencyjną. Na rys. 15a-h przedstawiono powierzchnie plastyczności stali 18G2A poddanej wstępnie zadanej



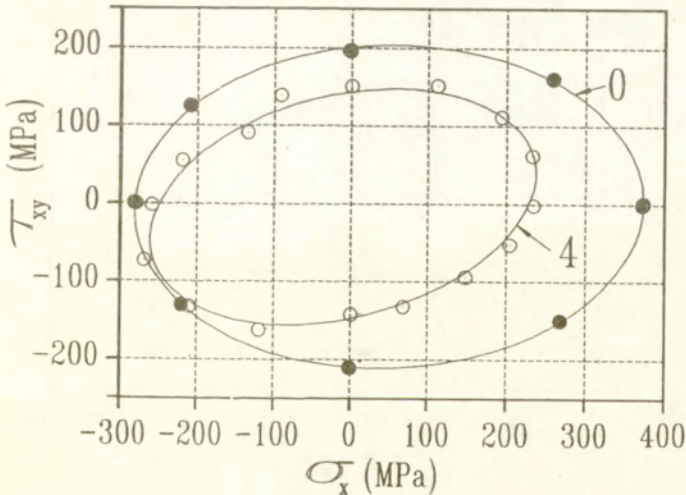
Rys.15a Porównanie początkowej powierzchni plastyczności określonej z ośmiu próbek obciążanych dla różnych dróg proporcjonalnych (0) z powierzchnią plastyczności wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału po programie obciążeń cyklicznych rozpoczynanych od kierunku 0° (1).



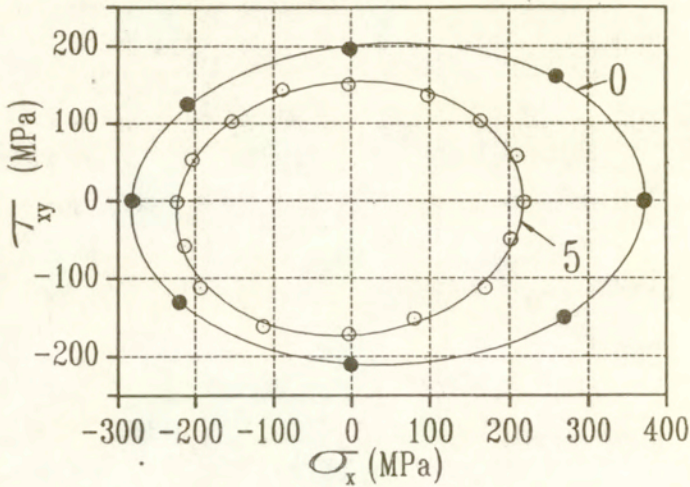
Rys.15b Porównanie początkowej powierzchni plastyczności określonej z ośmiu próbek obciążanych dla różnych dróg proporcjonalnych (0) z powierzchnią plastyczności wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału po programie obciążeń cyklicznych rozpoczynanych od kierunku 45° (2).



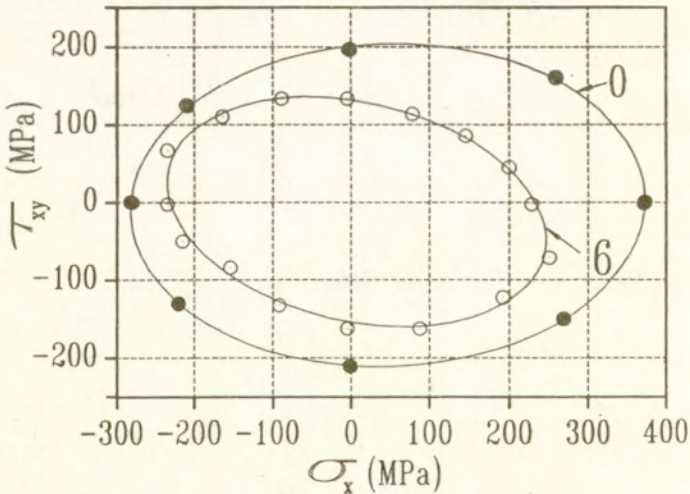
Rys.15c Porównanie początkowej powierzchni plastyczności określonej z ośmiu próbek obciążanych dla różnych dróg proporcjonalnych (0) z powierzchnią plastyczności wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału po programie obciążeń cyklicznych rozpoczynanych od kierunku 90° (3).



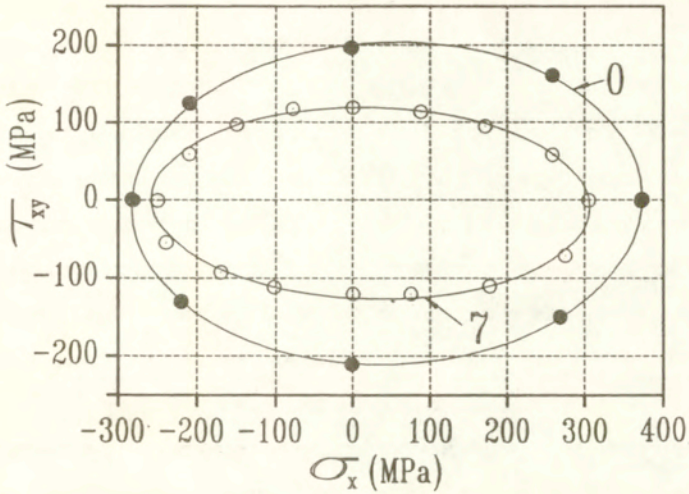
Rys.15d Porównanie początkowej powierzchni plastyczności określonej z ośmiu próbek obciążanych dla różnych dróg proporcjonalnych (0) z powierzchnią plastyczności wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału po programie obciążeń cyklicznych rozpoczynanych od kierunku 135° (4).



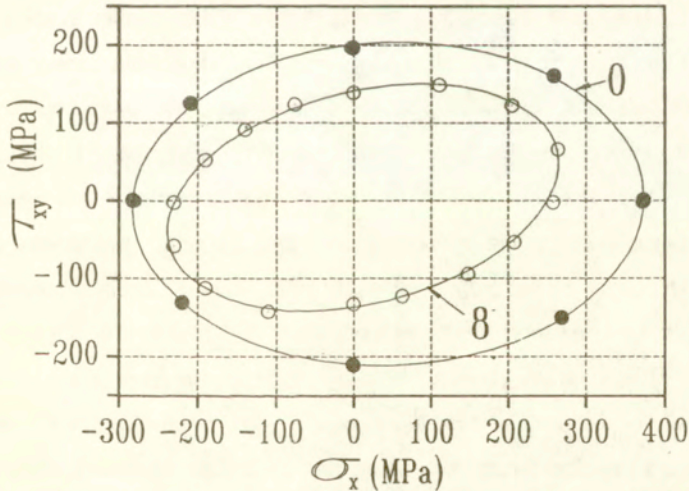
Rys.15e Porównanie początkowej powierzchni plastyczności określonej z ośmiu próbek obciążanych dla różnych dróg proporcjonalnych (0) z powierzchnią plastyczności wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału po programie obciążeń cyklicznych rozpoczynanych od kierunku 180° (5).



Rys.15f Porównanie początkowej powierzchni plastyczności określonej z ośmiu próbek obciążanych dla różnych dróg proporcjonalnych (0) z powierzchnią plastyczności wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału po programie obciążeń cyklicznych rozpoczynanych od kierunku 225° (6).



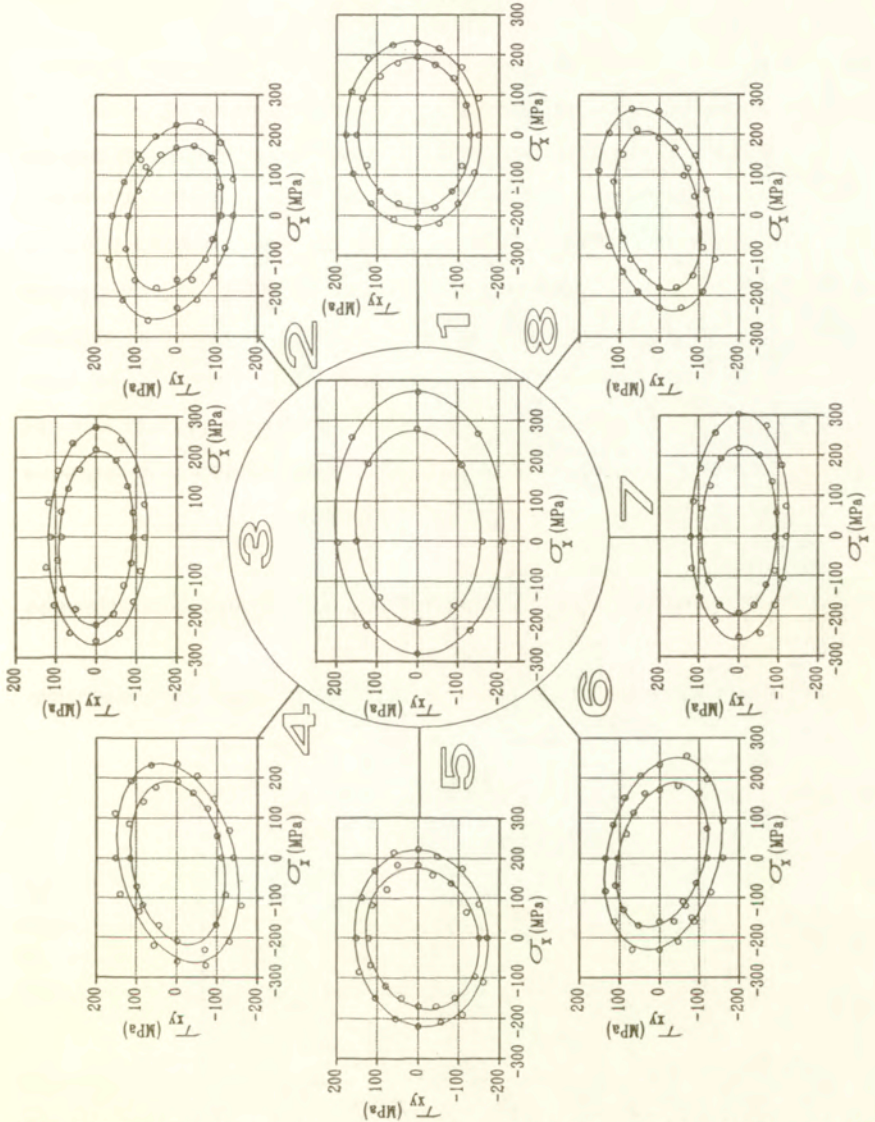
Rys.15g Porównanie początkowej powierzchni plastyczności określonej z ośmiu próbek obciążanych dla różnych dróg proporcjonalnych (0) z powierzchnią plastyczności wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału po programie obciążeń cyklicznych rozpoczynanych od kierunku 270° (7).



Rys.15h Porównanie początkowej powierzchni plastyczności określonej z ośmiu próbek obciążanych dla różnych dróg proporcjonalnych (0) z powierzchnią plastyczności wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału po programie obciążeń cyklicznych rozpoczynanych od kierunku 315° (8).

historii obciążeń cyklicznych. Kolejne rysunki ilustrują rezultaty cyklowań rozpoczynających się odpowiednio od kierunku $\varphi = 0^\circ; 45^\circ; 90^\circ; 135^\circ; 180^\circ; 225^\circ; 270^\circ$ i 315° , dla $\varepsilon_{\text{off}}=5 \times 10^{-5}$. Na rysunkach tych dodatkowo zamieszczono początkową powierzchnię plastyczności dla wspomnianego offsetu otrzymaną w wyniku testowania ośmiu próbek, która jest na nich oznaczona indeksem "0", natomiast powierzchnie reprezentujące kierunek, od którego zaczynano cyklowanie oznaczono odpowiednio indeksami od "1" do "8" zgodnie z rys.7. Nakłuwanie powierzchni plastyczności materiału po cyklowaniu zawsze było rozpoczynane od kierunku, dla którego rozpoczynano program obciążania cyklicznego.

Jak widać z tych rysunków, powierzchnie materiału po cyklowaniach we wszystkich przypadkach położone są wewnątrz powierzchni początkowej, a zatem badana stal uległa osłabieniu w rozpatrywanym obszarze odkształcenia. Analizując kształt uzyskanych powierzchni łatwo zauważyć, że jest on zależny od kierunku cyklowania. Największy bowiem stopień osłabienia otrzymywano na kierunkach pokrywających się z kierunkami deformacji cyklicznej. Warto również zwrócić uwagę w tym miejscu na to, że na kształt powierzchni plastyczności dla danego kierunku cyklowania nie miał wpływu zwrot określający początek programu obciążeń cyklicznych. Innymi słowy, kształt i wymiary powierzchni uzyskanych dla kierunku cyklowania "rozciąganie - ściskanie", zarówno gdy program rozpoczynano od rozciągania jak i od ściskania, był niemal identyczny. To samo stwierdzenie dotyczy pozostałych, badanych w programie, kierunków. Program obciążeń cyklicznych zadawanych w warunkach z kombinacją obciążeń, tj. dla kierunków $\varphi = 45^\circ; 135^\circ; 225^\circ; 315^\circ$, powodował stosunkowo duży obrót powierzchni plastyczności w porównaniu do powierzchni materiału w stanie wyjściowym. Fakt ten potwierdza jednak tylko wniosek przedstawiony wcześniej, że stopień osłabienia materiału był największy w kierunkach kolinearnych z kierunkami programu cyklicznego. Ponieważ rezultaty dla mniejszej definicji granicy plastyczności ($\varepsilon_{\text{off}}=10^{-5}$) nie wnoszą żadnych



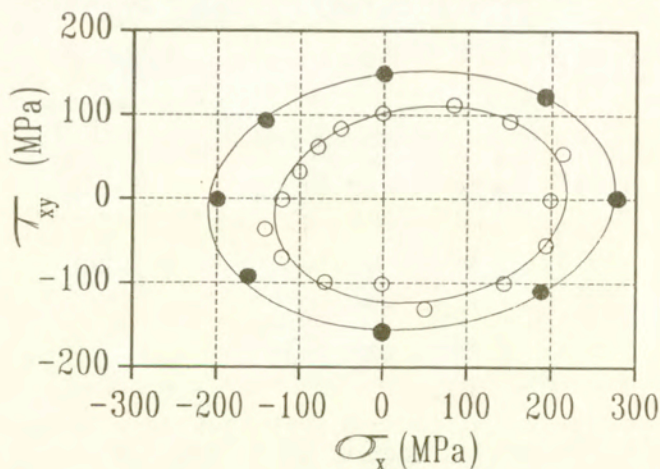
Rys.16 Zestawienie powierzchni plastyczności stali 18G2A określonych na podstawie metody sekwencyjnej obciążania jednej próbki po obciążeniach cyklicznych dla wszystkich badanych kierunków. Kolejne numery od 1 do 8 oznaczają powierzchnie materialu cyklowanego w kierunkach odpowiednio od 0 do 315° (wzrostowi numeru o 1 odpowiada wzrost kąta o 45°). W środku umieszczono powierzchnie otrzymane dla materialu w stanie dostawy, uzyskane w drodze testowania wielu próbek. Zestawienie obejmuje powierzchnie dla offsetów: 1×10^{-5} , 5×10^{-5} .

nowych istotnych spostrzeżeń, ich osobną graficzną prezentację pominięto, natomiast wyniki dla tego offsetu zawarto na rysunku zbiorczym, rys. 16.

Rys. 16 jest ilustracją wszystkich uzyskanych powierzchni plastyczności dla badanej stali o definicjach granicy plastyczności $\epsilon_{\text{off}}=1 \times 10^{-5}$ i $\epsilon_{\text{off}}=5 \times 10^{-5}$. W środku zaprezentowano powierzchnie materiału w stanie dostawy, wyznaczone metodą obciążania wielu próbek, natomiast na obrzeżach znajdują się powierzchnie wyznaczone metodą sekwencyjną dla stali poddanej programowi obciążeń cyklicznych. Numerami od 1 do 8 oznaczono wyniki uzyskane dla kolejnych kierunków obciążeń cyklicznych, przy czym numery te identyfikują także kierunek startu do cyklowania i są zgodne z numerami schematycznie przedstawionymi na rysunku prezentującym program obciążeń cyklicznych (rys. 7).

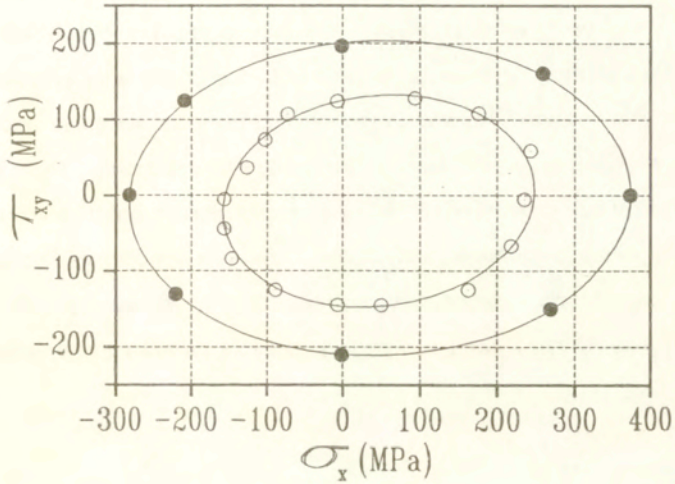
3.3 Wyniki dla materiału zdeformowanego wstępnie na drodze jednoosiowego rozciągania w procesie monotonicznego obciążania

Jak już wcześniej wspomniano, eksperyment polegał na wstępnym rozciągnięciu



Rys.17a Porównanie powierzchni plastyczności określonej na wielu próbkach dla materiału w stanie dostawy (czarne kółka) z powierzchnią wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału wstępnie odkształconego plastycznie przez monotoniczne rozciągnięcie (białe kółka). Powierzchnie wyznaczono dla offsetu 1×10^{-5}

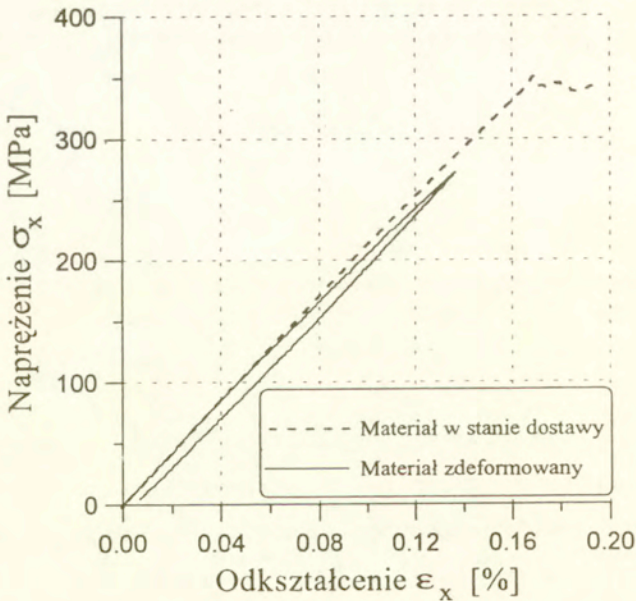
próbki do wartości odkształceń całkowitych wynoszącej 0.65 [%], po czym następowało odciążenie i w dalszej kolejności wyznaczenie 16 punktów powierzchni plastyczności metodą sekwencyjną.



Rys.17b Porównanie powierzchni plastyczności określonej na wielu próbkach dla materiału w stanie dostawy (czarne kółka) z powierzchnią wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału wstępnie odkształconego plastycznie przez monotoniczne rozciąganie (białe kółka) dla offsetu 5×10^{-5} .

Doświadczenie wykonano tylko dla kierunku rozciągania, ponieważ celem jego było określenie tylko jakościowej różnicy pomiędzy efektem odkształcania cyklicznego i monotonicznego. Rezultaty tego etapu badań pokazane są na rys.17a dla $\epsilon_{\text{off}}=1 \times 10^{-5}$ i rys.17b dla $\epsilon_{\text{off}}=5 \times 10^{-5}$ na tle powierzchni plastyczności stali w stanie dostawy. Początek wyznaczania powierzchni miał miejsce dla kierunku pokrywającego się z kierunkiem wstępnej deformacji plastycznej, po czym kolejne nakłucia przeprowadzano zgodnie z regułą pokazaną na rys.6. Dla obu definicji

granicy plastyczności uzyskano powierzchnie o wymiarach znacznie skurczonych w stosunku do otrzymanych dla materiału bez deformacji początkowej, a zatem, podobnie jak dla stali po cyklowaniu obciążeń, uzyskano efekt osłabienia materiału. Fakt osłabienia badanego materiału uzyskany po deformacji monotonicznej wymaga przedyskutowania, ponieważ dla większości materiałów przy tego typu deformacji występuje efekt umocnienia. Najlepiej w tym przypadku spojrzeć na wyniki doświadczalne zaprezentowane na rys. 18 w formie porównania charakterystyk rozciągania stali w stanie dostawy i tego samego materiału wstępnie poddanego deformacji plastycznej zrealizowanej również przy rozciąganiu. Rysunek ten tłumaczy otrzymane różnice wymiarów powierzchni plastyczności dla przyjętych offsetów. Jak widać, deformacja plastyczna w rozpatrywanym obszarze odkształceń powoduje ograniczenie zakresu sprężystego. W początkowym jednak etapie obciążania obie charakterystyki z dużą dokładnością pokrywają się. Należy



Rys. 18 Porównanie charakterystyk rozciągania materiału w stanie dostawy i materiału zdeformowanego wstępnie do wartości odkształceń całkowitych 0.65 [%].

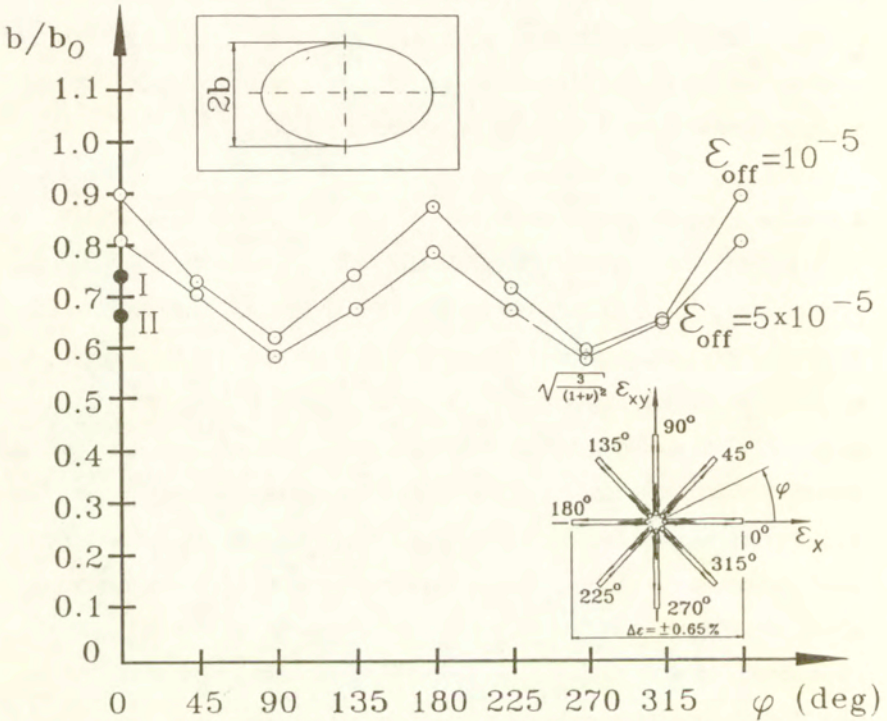
zauważyć, że efekt osłabienia ma charakter głównie izotropowy, tj. powierzchnie materiału w stanie dostawy i materiału wstępnie odkształconego są prawie współśrodkowe, a różnią się jedynie wymiarami.

Obserwując charakterystykę wytrzymałościową stali 18G2A, takiego rezultatu można było się spodziewać w zakresie rozpatrywanych wielkości deformacji (0.65 %), ponieważ zawierał on obszar przystanku plastycznego o przebiegu odpowiadającym materiałowi idealnie plastycznemu bez wzmocnienia.

4. Analiza rezultatów doświadczalnych

Dotychczasowe rozważania wykazały, że w rozpatrywanym zakresie odkształcenia zarówno deformacja cykliczna jak i deformacja monotoniczna w stali 18G2A powodują osłabienie materiału, jednak bez szczegółowej analizy jego stopnia w zależności od kierunku procesów deformacyjnych. W niniejszym paragrafie zagadnienie to zostanie krótko przedyskutowane. Stopień wpływu wstępnej deformacji plastycznej może być rozpatrzony na podstawie analizy wymiarów półosi elips reprezentujących powierzchnie plastyczności uzyskane dla różnych typów historii odkształcenia. Na rys.19 przedstawiono przebieg zmian stosunku małej półosi elipsy plastyczności materiału po programie obciążeń cyklicznych odniesionych do wymiaru tej półosi uzyskanej dla badanej stali w stanie dostawy jako funkcji kierunku rozpoczęcia cyklowań. Dodatkowo na rysunku tym zamieszczono tę samą wielkość dla materiału odkształconego wstępnie drogą monotonicznego rozciągania (czarne kółka). Prezentowane wyniki dotyczą dwóch rozpatrywanych definicji granicy plastyczności $\epsilon_{\text{off}}=1 \times 10^{-5}$ i $\epsilon_{\text{off}}=5 \times 10^{-5}$. Oznaczenia I, II odpowiednio odnoszą się do analogicznych offsetów dla materiału monotonicznie rozciągniętego. Rysunek ten wyraźnie identyfikuje stopnie osłabienia materiału w zależności od kierunku deformacji początkowej. Widać, że maksymalne osłabienie występuje dla tej półosi na kierunkach 90° i 270° , a więc kierunkach pokrywających się z kierunkami cyklowania. Z rezultatów tych wynika również, że na

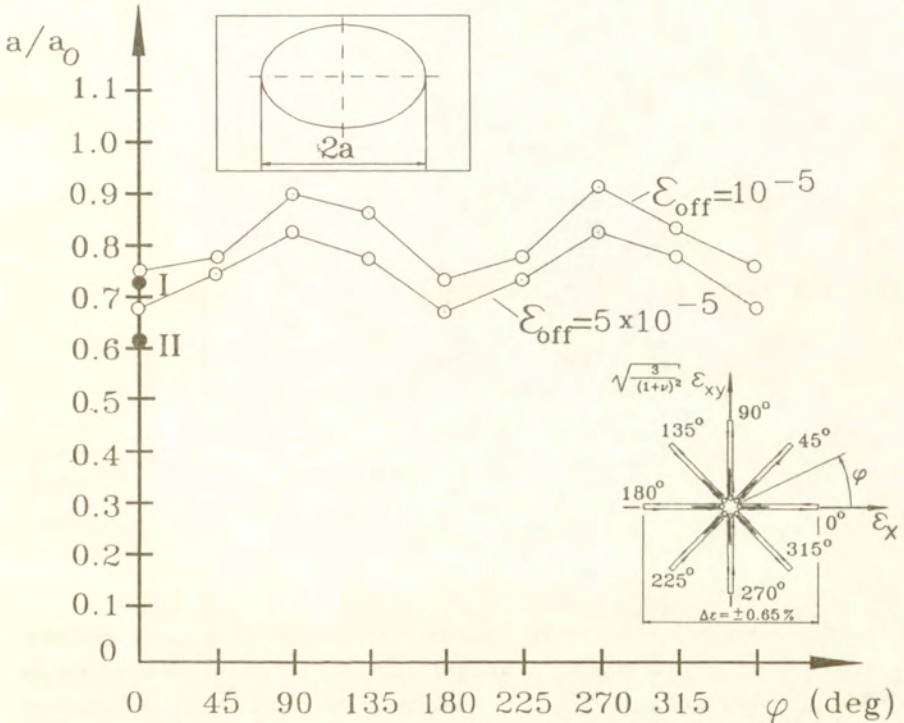
stopień osłabienia nie ma wpływu to, czy proces cyklowania dla danego kierunku rozpoczynany jest przykładowo w kierunku półośi dodatniej czy ujemnej, tj. na



Rys.19 Wykres zmian stosunku malej półośi powierzchni plastycznosci materialu wstepnie obciazanego cyklicznie lub monotonicznie (b) i tej samej półośi dla materialu w stanie dostawy (b_0) w funkcji kierunku realizowanych obciazen (φ). Kolejne punkty polaczone liniami reprezentuja wyniki dla materialu cyklowanego. Przedstawione wyniki dotycza dwuch definicji granicy plastycznosci: 10^{-5} , 5×10^{-5} . Symbolami I, II, odpowiednio do tych definicji, oznaczono rezultaty dla materialu zdeformowanego wstepnie na drodze monotonicznego rozciagnania.

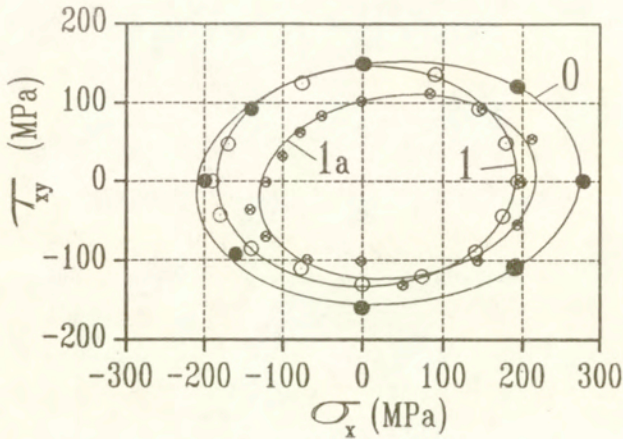
przyklad stopien oslabienia na kierunku skrecanie dodatnie - skrecanie ujemne dla cyklowania rozpoczynanego od kierunku 90° (skrecanie dodatnie) jest prawie

jednakowy, jak dla cyklowania rozpoczynanego od kierunku 270° (skręcanie ujemne). Wartości osłabienia na kierunkach poprzecznych w stosunku do cyklowania są znacznie mniejsze. Potwierdzenie tych spostrzeżeń znajdujemy także na rys.20 reprezentującym stosunki wymiarów wielkich pósi elips dla materiału po cyklowaniu do pósi wielkiej elipsy reprezentującej powierzchnię plastyczności materiału wyjściowego. Oznaczenia na tym rysunku są analogiczne jak na rys.19.



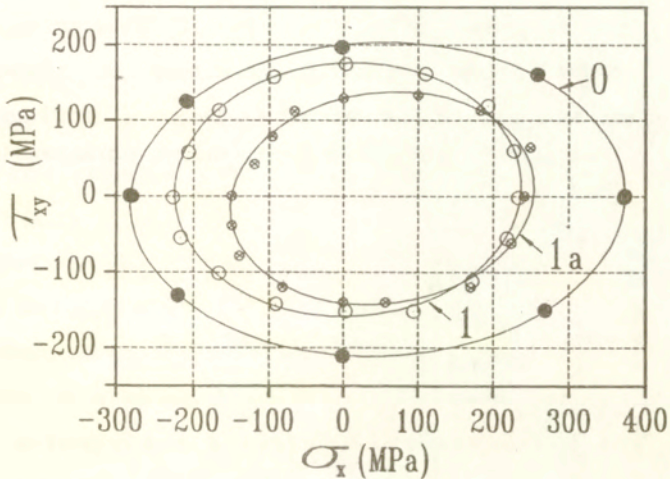
Rys.20 Wykres zmian stosunku wielkiej pósi powierzchni plastyczności materiału wstępnie obciążanego cyklicznie lub monotonicznie (a) i tej samej pósi dla materiału w stanie dostawy (a_0) w funkcji kierunku realizowanych obciążeń (φ). Kolejne punkty połączone liniami reprezentują wyniki dla materiału cyklowanego. Przedstawione wyniki dotyczą dwóch definicji granicy plastyczności: 10^{-5} , 5×10^{-5} . Symbolami I, II, odpowiednio do tych definicji, oznaczono rezultaty dla materiału zdeformowanego wstępnie na drodze monotonicznego rozciągania.

Z obu ostatnich rysunków wynika, że stopień osłabienia materiału, uzyskany podczas wstępnej deformacji plastycznej w drodze monotonicznego rozciągania, jest większy niż po cyklowaniu w tym samym kierunku. Wyraźniej można to zaobserwować, porównując odpowiednie powierzchnie plastyczności. Zestawienia takie przedstawiają rys.21 i rys.22 odpowiednio dla $\epsilon_{\text{off}}=1 \times 10^{-5}$ i $\epsilon_{\text{off}}=5 \times 10^{-5}$.



Rys.21 Porównanie powierzchni plastyczności określonej na wielu próbkach materiału w stanie dostawy (0) z powierzchniami wyznaczonymi sekwencyjnie na jednej próbce materiału wstępnie odkształconego plastycznie przez monotoniczne rozciąganie (1a) oraz cyklowanego w kierunku rozciąganie - ściskanie (1). Powierzchnie wyznaczone dla offsetu 1×10^{-5} .

Rysunki te zawierają powierzchnie plastyczności stali 18G2A w stanie dostawy (oznaczone przez symbol "0") oraz tego samego materiału cyklowanego w kierunku rozciąganie - ściskanie z początkiem od rozciągania (oznaczone symbolem "1") i zdeformowanego monotonicznie (oznaczone symbolem "1a") do

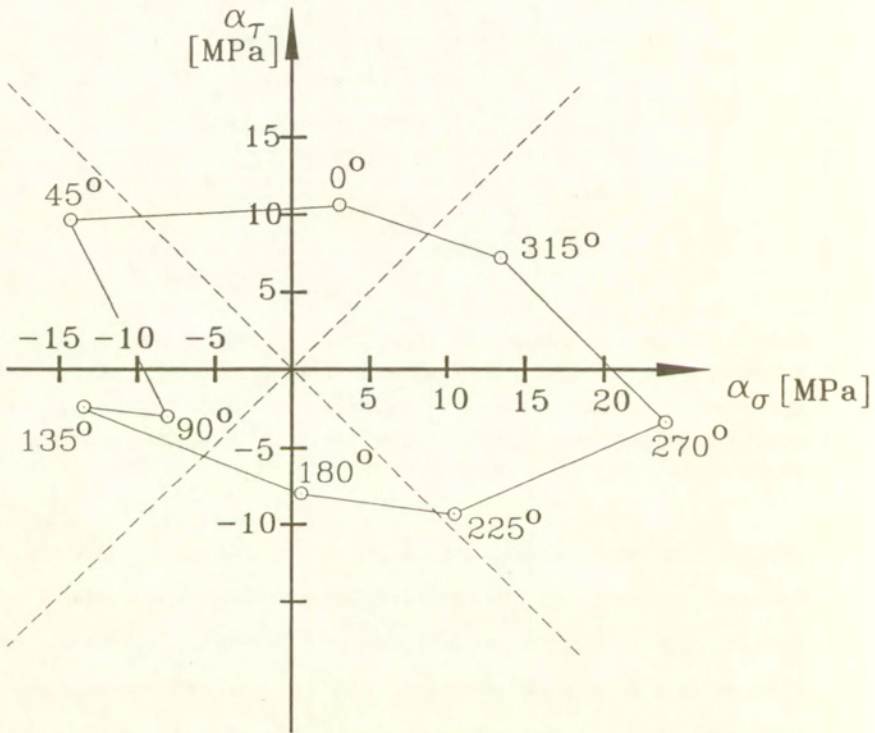


Rys.22 Porównanie powierzchni plastyczności określonej na wielu próbkach materiału w stanie dostawy (0) z powierzchniami wyznaczonymi sekwencyjnie na jednej próbce materiału wstępnie odkształconego plastycznie przez monotoniczne rozciąganie (1a) oraz cyklowanego w kierunku rozciąganie - ściskanie (1). Powierzchnie wyznaczono dla offsetu 5×10^{-5} .

wartości odkształcenia analogicznej jak uzyskiwanej przy obciążeniach cyklicznych. Taka różnica w wymiarach powierzchni plastyczności, otrzymana dla dwóch różnych form deformacji, związana jest bezpośrednio z historią obciążania. Stosunkowo łatwo jest ją zinterpretować analizując rys.12. Jak widać, materiał w stosunku do pierwszego cyklu, w którym występował obszar płynięcia ze względu na osiągnięcie przystanku plastycznego, wykazywał pewien stopień umocnienia uzyskiwany w cyklu ustalonym. Właśnie to umocnienie jest przyczyną zwiększonych wymiarów powierzchni plastyczności materiału cyklowanego w stosunku do powierzchni o

takiej samej definicji granicy plastyczności uzyskanej dla stali zdeformowanej wstępnie w procesie monotonicznego obciążania.

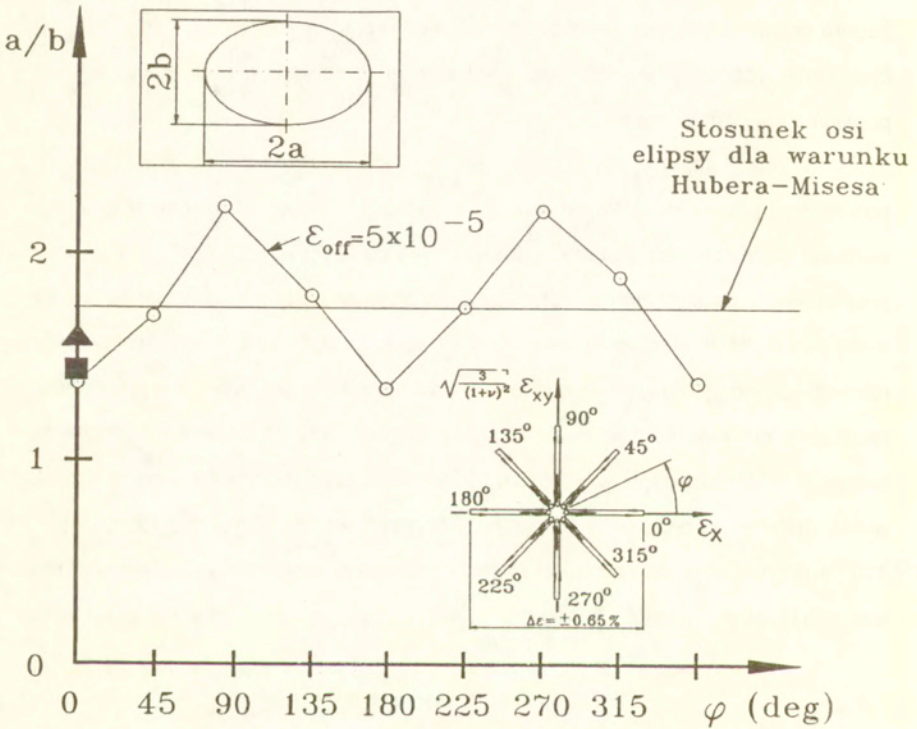
Ciekawą interpretację graficzną zachowania się położenia środka powierzchni plastyczności stali po deformacji cyklicznej zawiera rys. 23. Zamieszczono na nim położenia środków wszystkich powierzchni wyznaczonych po cyklowaniu na płaszczyźnie określonej przez oś przemieszczenia o zwrocie w kierunku skręcania dodatniego (α_τ) oraz oś przemieszczenia o zwrocie w kierunku rozciągania (α_σ).



Rys.23 Ilustracja ewolucji środka powierzchni plastyczności względem początku układu współrzędnych dla materiału cyklowanego według różnych dróg obciążenia schematycznie pokazanych na rysunku 7.

Przy punktach oznaczono od jakiego kierunku rozpoczynano proces cyklowania. Z rezultatów tych wynika, że deformacja cykliczna powodowała dość charakterystyczną tendencję, która polegała na umiejscowieniu każdego środka powierzchni plastyczności w pobliżu osi obróconej przeciwnie do ruchu wskazówek zegara prawie o kąt prosty w stosunku do kierunku cyklowania, tj. na przykład gdy cyklowanie rozpoczynano od rozciągania to środek powierzchni znajdował się prawie na osi dodatniego skręcania.

W pracy rozpatrywano także jak wymiary uzyskanych eksperymentalnie powierzchni plastyczności korespondują z wymiarami powierzchni teoretycznej dla warunku plastyczności Hubera - Misesa. Ilustracją tych rozważań jest wykres prezentowany na rys. 24, na którym pokazano zmianę stosunku wielkiej półosi do małej półosi dla powierzchni plastyczności o offsecie $\epsilon_{\text{off}}=5 \times 10^{-5}$, uzyskanych przy różnych proporcjonalnych drogach cyklowania. Ponadto wykres uzupełniono rezultatem dla materiału w stanie dostawy (trójkąt) oraz rezultatem dla materiału wstępnie odkształconego w procesie monotonicznego obciążania (kwadrat). Jak widać, materiał po programie obciążeń cyklicznych w kierunkach 45° , 135° , 225° i 315° w przybliżeniu reprezentował wymiary powierzchni plastyczności określonej dla warunku Hubera - Misesa.



Rys.24 Wykres zmian stosunku wielkiej i małej półosi powierzchni plastyczności stali w stanie dostawy (trójkąt), materiału wstępnie obciążanego cyklicznie (kolejne punkty połączone liniami) oraz wstępnie zdeformowanego w procesie monotonicznego obciążania (kwadrat) w funkcji kierunku realizowanych obciążeń (φ) Przedstawione wyniki dotyczą definicji granicy plastyczności: 5×10^{-5} . Poziomą linią ciągłą zaznaczono stosunek, który reprezentuje wymiary elipsy odpowiadające kryterium uplastycznienia Hubera-Misesa.

5. Wnioski końcowe

W pracy przedstawiono wyniki testów, których głównym celem było określenie efektów wywołanych różnokierunkową deformacją o charakterze cyklicznym na kształt, wymiary oraz położenie powierzchni plastyczności stali 18G2A.

Wyznaczone pierwotne powierzchnie plastyczności dla przyjętych definicji granic plastyczności wykazały anizotropowe cechy badanego materiału. Jednakże w sensie liczbowych wartości dla górnej i dolnej granicy plastyczności materiał wykazywał cechy izotropii, tj. posiadał jednakowe, wyrażone w intensywnościach, wartości wspomnianych granic dla ośmiu rozpatrywanych kierunków, z tym że uzyskiwano je dla różnych wielkości intensywności odkształcenia plastycznego.

Przyjęty program obciążeń cyklicznych wywoływał w badanym materiale efekt osłabienia odzwierciedlony wyraźnym zmniejszeniem wymiarów powierzchni plastyczności materiału po cyklowaniu w stosunku do wielkości powierzchni dla stali w stanie dostawy.

Stopień osłabienia badanej stali uzależniony był od kierunku deformacji cyklicznej i osiągał maksymalną wartość na kierunkach pokrywających się z kierunkami cyklowania. Na stopień osłabienia, przy danym kierunku cyklowania, nie miał wpływu zwrot początkowych obciążeń.

Deformacja zadawana w procesie monotonicznego rozciągania, o wartości jednakowej jak przy programie cyklicznym, w rozpatrywanym zakresie odkształcenia wywoływała osłabienie o przeszło 11 [%] większe w stosunku do materiału cyklowanego.

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. K. Mallick, S.K. Samanta, A. Kumar, An Experimental Study of the Evolution of Yield Loci for Anisotropic Materials Subjected to Finite Shear Deformation, *J. Eng. Mat. Tech.*, 113, 192-198, 1991.
2. 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. Tech.*, 108, 313-320, 1986.
3. E. Shiratori, K. Ikegami, K. Kaneko, Plastic Behaviours of Initially Anisotropic Metals After Multi Prestrainings, in: *Colloques internationaux du CNRS No 295 - Comportement Mecanique Des Solides Anisotropes*, 257-272.
4. Y. Ohashi, M. Kawai, H. Shimizu, Effects of Prior Creep on Subsequent Plasticity of Type 316 Stainless Steel at Elevated Temperature, *J. Eng. Mat. Tech.*, 105, 257-263, 1983.
5. W. Szczepiński, On the Effect of Plastic Deformation on Yield Condition, *Arch. Mech.*, 2, 15, 275-296, 1963.
6. K. Ikegami, Y. Niitsu, Effect of Creep Prestrain on Subsequent Plastic Deformation, *Int. J. Plast.*, 1, 331-345, 1985.
7. R. Marjanovic, W. Szczepiński, Yield Surfaces of the M-63 Brass Prestrained by Cyclic Biaxial Loading, *Arch. Mech.*, 26, 311-320, 1974.
8. J. Miastkowski, Yield Surface of Material Subjected to Combined Cyclic Loading, *Arch. Mech.*, 30, 203-215, 1978.
9. J. F. Williams, N. L. Svensson, Effect of Tensile Prestrain on the Yield Locus of 1100 - F Aluminium, *J. Strain Anal.*, 5, 128 - 139, 1970.
10. J. F. Williams, N. L. Svensson, Effect of Torsional Prestrain on the Yield Locus of 1100 - F Aluminium, 6, 263 - 272, 1971.

11. J. Miastkowski, W. Szczepiński, An Experimental Study of Yield Surfaces of Prestrained Brass, *Int. J. Solids and Structures*, 1, 189-194, 1965.
12. 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, 1968.
13. J. Miastkowski, Wpływ historii obciążenia na powierzchnie plastyczności, *Mech. Teor. Stos.*, 6, 1, 3, 1968.
14. H. Ishikawa, K. Sasaki, Stress-Strain Relations of SUS304 Stainless Steel After Cyclic Preloading, *J. Eng. Mat. Techn.*, 111, 417-423, 1989.
15. H. Ishikawa, K. Sasaki, Yield Surfaces of SUS304 Under Cyclic Loading, *J. Eng. Mat. Techn.*, 110, 364-371, 1988.
16. 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.
17. 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.
18. J. Lipkin, J.C. Swearingen, On the Subsequent Yielding of an Aluminium Alloy Following Cyclic Prestraining, *Metallurgical Transaction A*, 6A, 167-177, 1975.
19. B.H. Jones, Assessing Instability of Thin-walled Tubes under Biaxial Stresses in the Plastic Range, *Experimental Mechanics*, 8, 1, 10-18, 1968.
20. W. Szczepiński, L. Dietrich, J. Miastkowski, Plastic properties of metals, part one in: *Experimental Methods in Mechanics of Solids*, PWN - Elsevier, 1990.
21. 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.

22. 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.
23. L. Dietrich, R. Kiryk, G. Socha, M. Śliwowski, Identyfikacja plastycznej anizotropii stopu aluminium, w przygotowaniu, 1994.
24. A. Phillips, C.S. Liu, J.W. Justusson, An Experimental Investigation of Yield Surfaces at Elevated Temperatures, Acta Mechanica, 14, 119-146, 1972.
25. 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.
26. Z.L. Kowalewski, M. Śliwowski, G. Socha, Określanie cyklicznych własności stali 18G2A na podstawie krzywych szkieletowych dla płaskiego stanu naprężenia, (złożona do druku w Pracach IPPT), 1994.
27. R.V. Mises, Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen, Zeitsch. Angew. Math. Mech., 8, 3, 161-185, 1928.
28. W. Szczepiński, On Deformation-induced Plastic Anisotropy of Sheet Metals, Arch. Mech., 45, 1, 3-38, 1993.