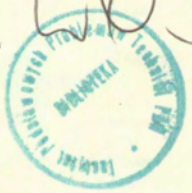
5.17.10. — obciążenia jedno- i wieloosiowe

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

OKREŚLANIE CYKLICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI STALI 18G2A NA PODSTAWIE KRZYWYCH SZKIELETOWYCH DLA PŁASKIEGO STANU NAPRĘŻENIA

32/1994

P 269



WARSZAWA 1994

http://rcin.org.pl

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 3 października 1994 r.

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
BIBLIOTEKA
56617

Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 2,50 Ark. druk. 3,10
Oddano do drukarni w październiku 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

OKREŚLANIE CYKLICZNYCH WŁASNOŚCI STALI 18G2A NA PODSTAWIE KRZYWYCH SZKIELETOWYCH DLA PŁASKIEGO STANU NAPRĘŻENIA

Streszczenie

Celem poniższej pracy jest ocena własności niskostopowej stali konstrukcyjnej, oznaczanej według polskiej normy symbolem 18G2A, po programie obciążeń cyklicznych na podstawie krzywych szkieletowych. Badania przeprowadzono na cienkościennych próbkach rurkowych w płaskim stanie naprężenia realizowanym przez różne kombinacje siły osiowej i momentu skręcającego. Własności materiału w stanie dostawy oceniono na podstawie powierzchni plastyczności wyznaczonej metodą testowania wielu próbek i stanowiły one punkt odniesienia do porównań zmian własności materiału pod wpływem celowo wprowadzanej deformacji cyklicznej.

W pracy zaproponowano nową koncepcję oceny własności materiału poddanego deformacjom o charakterze cyklicznym polegającą na określeniu tzw. cyklicznej powierzchni plastyczności.

Przyjęty program obciążeń cyklicznych, zawierający obciążenia o stałej i malejącej amplitudzie, wywoływał w badanej stali efekt osłabienia w rozważanym zakresie odkształceń plastycznych, przy czym maksymalny jego stopień obserwowano w kierunkach zgodnych z kierunkami prowadzonego obciążenia cyklicznego. Przeprowadzone badania wykazały, że testowany materiał, posiadający w stanie dostawy anizotropowe własności plastyczne, pod wpływem przyjętego programu obciążeń cyklicznych wykazywał jednakowe stopnie osłabienia dla każdego rozpatrywanego kierunku.

http://rcin.org.pl

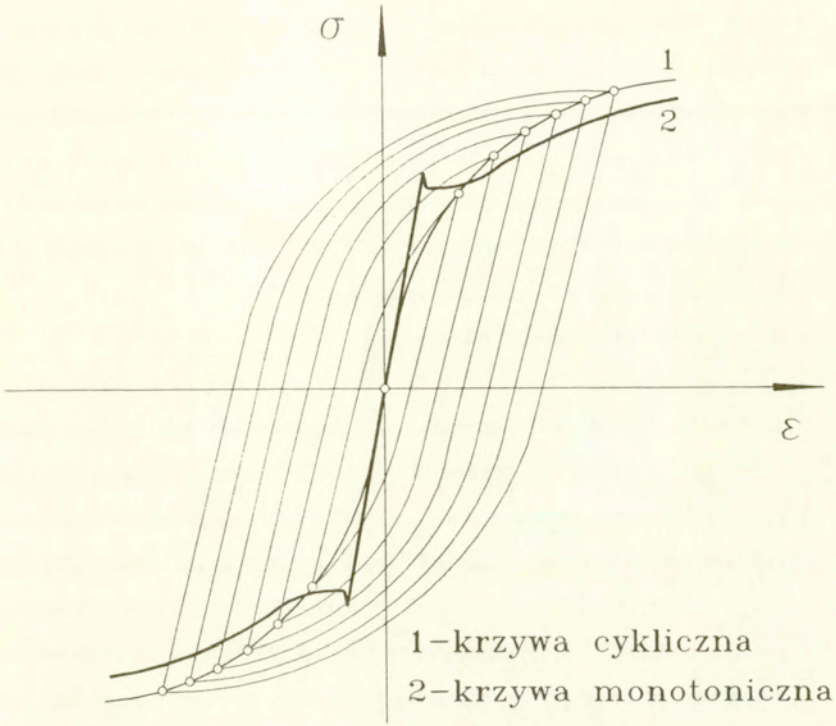
1. Wstęp

Badania doświadczalne zachowania metali poddanych cyklicznym obciążeniom przekraczającym początkową granicę plastyczności stanowią obecnie jeden z istotnych problemów mechaniki plastycznych deformacji. W ostatnim dziesięcioleciu można zaobserwować wzrost liczby prac dotyczących badań w złożonym stanie naprężenia, w szczególności badań przy nieproporcjonalnych drogach cyklicznego obciążania [1-9]. Wiąże się to również w dużej mierze z jakościowymi zmianami w technice eksperymentalnej, tzn. możliwością komputerowego sterowania wieloosiowych maszyn wytrzymałościowych, pracujących w pętli sprzężenia zwrotnego, oraz cyfrowej rejestracji i dalszej obróbki wyników badań przy pomocy coraz doskonalszych urządzeń i oprogramowania maszyn cyfrowch.

Zjawiska obserwowane podczas cyklicznej deformacji metali w zakresie plastycznym są dobrze poznane i udokumentowane [10-23]. Chodzi tu w szczególności o dodatkowe wzmacnianie (bądź osłabianie) materiału nabywane w procesie wielokrotnego powtarzania obciążeń w wybranym zakresie. Drugim charakterystycznym zjawiskiem jest stabilizacja deformacji w miarę wzrostu liczby cykli aż do osiągnięcia stanu nasycenia. Mówi się wówczas o osiągnięciu cyklu ustalonego na wykresie zależności naprężenie-odkształcenie, bądź ustalonej pętli histerezy plastycznej.

W opisie stanów ustabilizowanej cyklicznej deformacji materiałów często używana jest tzw. krzywa cykliczna zwana w literaturze również krzywą szkieletową [19]. Najbardziej precyzyjną definicją krzywej cyklicznej [4, 5, 19], spośród spotykanych w literaturze, jest określenie jej jako przebiegu łączącego wierzchołki ustalonych pętli histerezy plastycznej uzyskanej w kilku, w pełni odwracalnych (symetrycznych) próbach cyklicznego obciążania, w których utrzymywano stałą amplitudę odkształceń plastycznych (por. rys.1). Tak otrzymaną konstrukcję geometryczną porównuje się często z monotoniczną krzywą materiałową, co pozwala ocenić czy mamy do czynienia z materiałem cyklicznie

http://rcin.org.pl



Rys.1 Przykładowa ilustracja sposobu otrzymywania krzywej cyklicznej (szkieletowej) na wielu próbkach i jej porównanie z krzywą rozciągania przy monotonicznym obciążaniu.

wzmacniającym się (krzywa szkieletowa przebiega powyżej), czy cyklicznie osłabiającym się (krzywa cykliczna przebiega poniżej zależności materiałowej) bądź niewrażliwym na cykliczną deformację.

Z podanej powyżej definicji wynika, że podstawowym sposobem określania krzywej cyklicznej jest metoda z wykorzystaniem wielu próbek. Każda z próbek poddana jest symetrycznym cyklom obciążenia z utrzymywaniem stałej, ale różniącej

http://rcin.org.pl

się między sobą, amplitudy odkształceń plastycznych. 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 tzw. "życia zmęczeniowego". 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 alternatywne procedury z użyciem jednej próbki.

Najczęściej stosowane metody to:

- *test stopniowanych bloków obciążeń cyklicznych* - polegający na doprowadzeniu próbki do ustabilizowanej deformacji w każdym z kolejno następujących po sobie, ale różniących się, bloków o stałej amplitudzie. Badania przeprowadzone według tej procedury pokazały, że ilość cykli odpowiadająca około 20% życia zmęczeniowego wystarcza na ogół do stabilizacji deformacji plastycznej w każdym bloku. Badano również efekt sekwencji bloków obciążenia. Stwierdzono, że sekwencja od dużych do małych amplitud odkształcenia w blokach daje lepszą zgodność z krzywą cykliczną wyznaczoną na wielu próbkach.

- *test przyrostowy* - polegający na cyklicznym deformowaniu próbki z określoną częstotliwością w powtarzających się blokach, których amplituda liniowo narasta i spada (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.

- *monotoniczne rozciąganie po cyklicznym odkształcaniu* - metoda ta może być stosowana w połączeniu z dwoma poprzednimi i polega na monotonicznym

http://rcin.org.pl

rozciąganiu po uprzednim ustabilizowaniu cyklicznej plastycznej deformacji. Przebieg krzywej monotonicznej jest wówczas na ogół zbliżony do krzywej szkieletowej.

- *metoda indywidualnej pętli histerezy* - Morrow w pracy [20] zasugerował, że pojedyncza pętla histerezy w stanie ustalonym może być przekształcona przez inwersję , jeżeli współrzędne opisujące pętlę podzielić przez 2. Należy podkreślić, że metoda ta nie dla wszystkich materiałów daje dobre wyniki [21].

- *test dekrementalny* - uważany za najszybszą i najbardziej skuteczną metodę doświadczalnego określania krzywej cyklicznej, który polega na pierwotnym doprowadzeniu badanej próbki do stanu ustabilizowanej deformacji przy wybranej stałej amplitudzie odkształceń a następnie poddaniu cyklom o malejącej liniowo do zera amplitudzie odkształceń całkowitych. Ilość cykli jest tak dobierana aby zapewnić określenie krzywej szkieletowej z żądaną dokładnością. Metoda ta była z powodzeniem stosowana w pracy [3] do rejestracji krzywych cyklicznych przy różnych nieproporcjonalnych drogach cyklicznego obciążania.

Test 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

http://rcin.org.pl

może być traktowana jako obwiednia powierzchni plastyczności materiału poddanego wstępnej deformacji cyklicznej w różnych kierunkach. 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 plastycznej cyklicznej deformacji w złożonym stanie obciążenia a krzywe szkieletowe nie są zależnościami materiałowymi, lecz pewnymi konstrukcjami geometrycznymi. Podobną analogię zastosowano w pracach [22, 23] do opisu teoretycznego bardzo złożonych nieproporcjonalnych obciążeń cyklicznych z wykorzystaniem wielopowierzchniowych modeli teorii plastyczności Mroza [24].

2. Procedura doświadczalna

2.1 Badany materiał i próbka

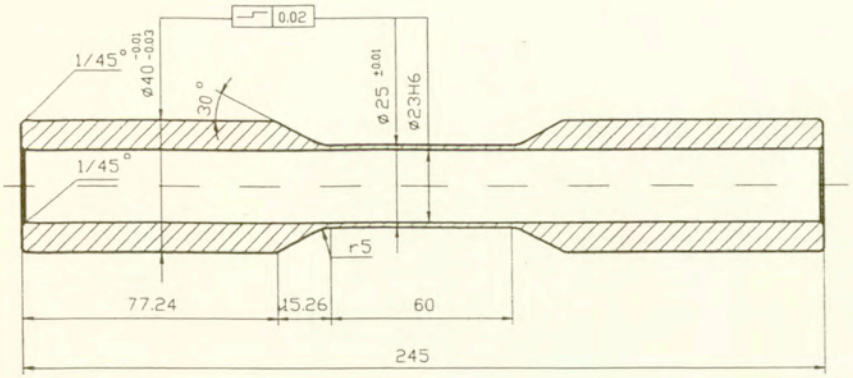
Badania przeprowadzono dla stali 18G2A w stanie dostawy, której skład chemiczny zamieszczono w tabeli 1. Jest to stal konstrukcyjna niskostopowa o podwyższonej wytrzymałości, posiadająca strukturę ferrytyczno-perlityczną z niewielką ilością dodatkowych składników stopowych.

TABELA 1. Skład chemiczny stali 18G2A

materiał \ skł. stopowy	C	Mn	Si	P_{max}	S_{max}
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
18G2A	max 0.2	1.0 - 1.5	max 0.55	0.04	0.04

http://rcin.org.pl

Doświadczenia przeprowadzono na cienkościennych próbkach rurkowych, rys.2, przystosowanych do ich mocowania w dwuosiowej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 1343.



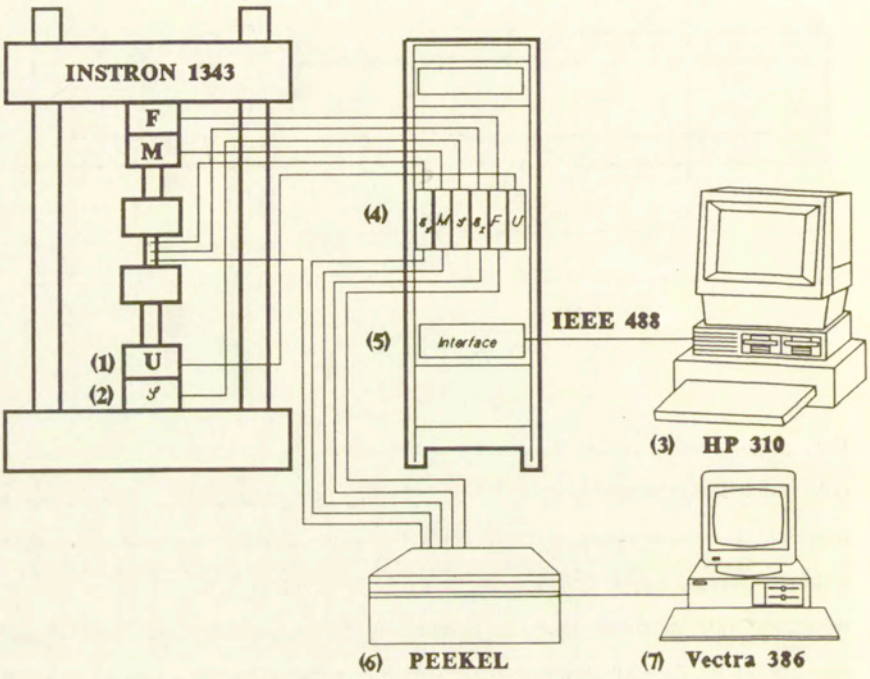
Rys.2 Próbka.

Przy projektowaniu próbki starano się maksymalnie wydłużyć część pomiarową w celu redukcji nierównomiernego rozkładu naprężeń na jej długości, wynikającego z przejścia od masywnej części chwytowej do delikatnej części pomiarowej. Jak wynika z danych literaturowych [25], wspomniana nierównomierność jest pomijalna dopiero wówczas, gdy stosunek długości pomiarowej do jej średnicy wewnętrznej jest większy od 10. Ze względów technologicznych wykonanie otworu wewnętrznego dla próbek rurkowych spełniających taką proporcję jest bardzo trudne do uzyskania i stąd większość stosowanych w badaniach tego typu próbek posiada wspomniany stosunek o wartościach zawartych w granicach od 2 do 4 [17, 18, 26], choć znane są rozwiązania gdzie wartość ta jest większa, np. 7.25, [27] lub mniejsza, np. 0.5, [28]. W naszym przypadku stosunek ten wynosił 2.6, co umożliwiło realizację cykli rozciąganie-ściskanie o ustalonej amplitudzie odkształceń całkowitych bez wystąpienia utraty stateczności próbki.

http://rcin.org.pl

2.2 Stanowisko badawcze

Badania wykonywano na maszynie wytrzymałościowej Instron 1343 umożliwiającej realizację złożonych stanów naprężenia poprzez różne kombinacje



Rys.3 Schemat stanowiska badawczego.

siły osiowej i momentu skręcającego. Pełny schemat stanowiska badawczego stosowanego do realizacji programu obciążeń cyklicznych oraz do określania

http://rcin.org.pl

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 Hewllet-Packard serii 310. Do wspomnianego komputera doprowadzone jest za pośrednictwem analogowych układów przetwarzających oraz przetwornika analogowo-cyfrowego sześć następujących sygnałów: 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. Integralną częścią tego układu jest wielokanałowy system pomiarowy firmy PEEKEL, który dzięki sprzęgnięciu z komputerem firmy Hewllet-Packard typu Vectra 386 zapewniał możliwość bieżącego obserwowania wyników pomiarowych oraz ich rejestrację dla wszystkich wykorzystywanych kanałów w przeprowadzanym aktualnie eksperymencie.

2.3 Wyniki badań podstawowych parametrów mechanicznych

Parametry mechaniczne badanego materiału określono na podstawie statycznej próby rozciągania próbki rurkowej, rys.2, w temperaturze pokojowej na maszynie wytrzymałościowej Instron, przy prędkości przemieszczenia tłoka wynoszącej 0.5 [mm/min]. Na podstawie wyników testu [29] wyznaczono moduł Younga ($E=2.3x10^5$ [N/mm^2]), górną granicę plastyczności ($R_g=380$ [N/mm^2]), dolną

http://rcin.org.pl

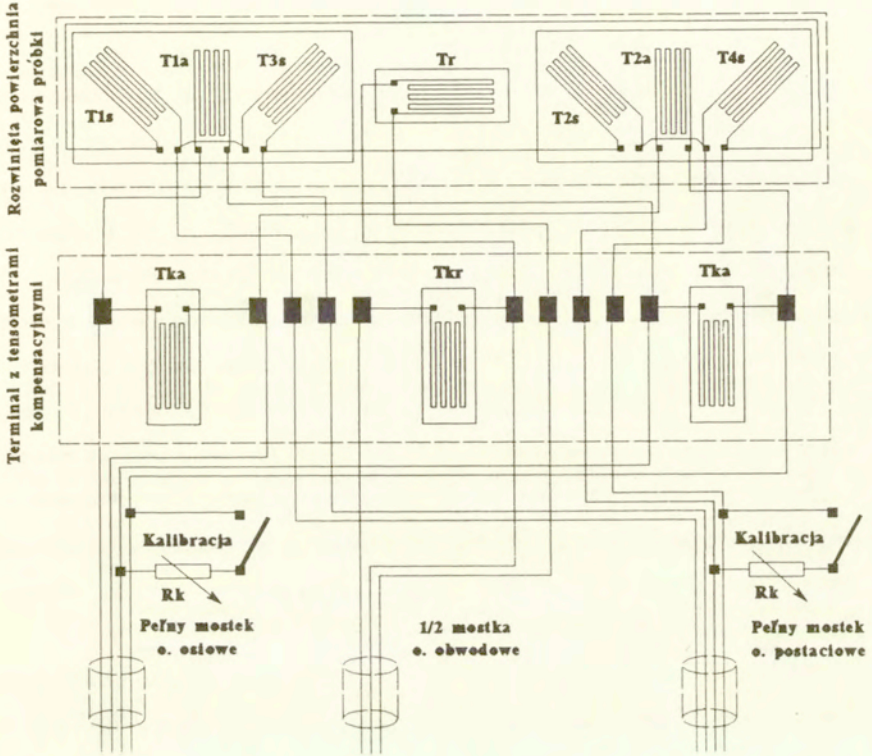
granicę plastyczności (R_d=345 [N/mm^2]), granicę wytrzymałości doraźnej (R_m=550 [N/mm^2]) oraz ciągliwość (43 [%]).

2.4 Pomiar odkształceń i obciążeń

Pomiarów odkształceń w próbach monotonicznego obciążania, wykonywanych dla określenia powierzchni plastyczności i w próbach z obciążeniami cyklicznymi, przeprowadzanych w celu wyznaczenia krzywych szkieletowych, dokonywano poprzez wykorzystanie 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 10 [V] odpowiadało odkształcenie 0.8 [%]. Rozdzielczość pomiaru odkształceń osiowych, postaciowych i obwodowych wynosiła $8x10^{-6}$.

http://rcin.org.pl

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].



Rys.4 Schemat tensometrycznych układów pomiarowych odkształcenia.

2.5 Opis programu badań

Program doświadczeń obejmował:

1. Określenie początkowej powierzchni plastyczności drogą monotonicznego obciążania wielu próbek w różnych kierunkach tak, aby równomiernie pokryć obszar wszystkich czterech ćwiartek płaszczyzny (σ_x, τ_{xy}).

http://rcin.org.pl

2. Realizację programu obciążeń cyklicznych zawierającego etap cykli o stałej amplitudzie oraz etap cykli o malejącej amplitudzie dla kierunków jednakowych jak przy wyznaczaniu powierzchni pierwotnej.

3. Określenie powierzchni plastyczności po obciążeniach cyklicznych metodą sekwencyjnego nakłuwania.

W celu wyznaczenia pierwotnej powierzchni plastyczności przygotowano 8 jednakowych próbek, z których każdą obciążano przy innym stosunku dwóch składowych odkształcenia 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 materiału w stanie dostawy, nieprzydatny. Spowodowane było to faktem, że krzywa rozciągania stali 18G2A w stanie dostawy zawiera przystanek plastyczności, który utrudnia sterowanie maszyną wytrzymałościową w tym zakresie, a tym samym uzyskanie zadanego "offsetu" odkształceń. Problemu tego nie było po programie cyklicznych obciążeń, po którym krzywe naprężenie - odkształcenie stawały się gładkie i stąd dla materiału zdeformowanego w procesie cyklowania do wyznaczenia powierzchni przyjmowano dużo prostszą sekwencyjną metodę kolejnych obciążeń jednej próbki.

Jednym z ważniejszych zagadnień przy wyznaczaniu punktów powierzchni plastyczności jest definicja granicy plastyczności, ponieważ jej wartość decyduje o kształcie i wymiarach powierzchni [30]. W literaturze można się spotkać z kilkoma typami definicji granicy plastyczności [31, 32, 33]. Spośród najczęściej stosowanych można wymienić:

a) uplastycznienie zdefiniowane poprzez granicę proporcjonalności,

b) uplastycznienie zdefiniowane przez powrotną ekstrapolację gładkiej części charakterystyki naprężenie-odkształcenie do przecięcia z osią naprężenia,

c) uplastycznienie odpowiadające z góry określonej wartości trwałego odkształcenia plastycznego.

http://rcin.org.pl

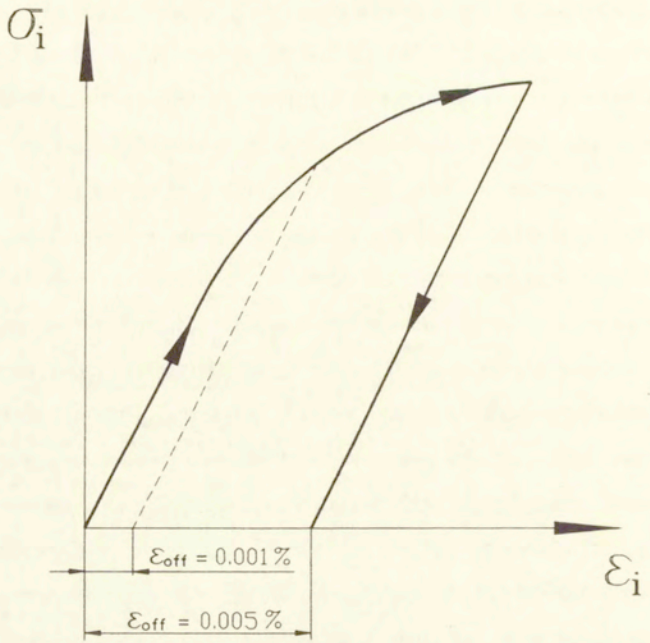
W opisywanym programie dla wyznaczenia powierzchni plastyczności badanego materiału zaadoptowano sposób (c). Procedura wyznaczania punktu powierzchni plastyczności na danej próbce realizowana była z wykorzystaniem oprogramowania dającego możliwość współpracy z interfejsem maszyny wytrzymałościowej Instron. Zgodnie z nim 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 0.005 [%]). 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. Ponadto na rysunku tym linią przerywaną zaznaczono dodatkowo rozpatrywany offset o wartości ε_{off}=0.001 [%], który wykorzystywano w celu przeanalizowania własności plastycznych materiału przy mniejszej wartości deformacji.

Drugim etapem programu doświadczeń było obciążanie cykliczne wzdłuż różnych dróg proporcjonalnych w płaszczyźnie (σ_x, τ_{xy}), zgodnie ze schematem zamieszczonym na rys.6. Program obciążeń cyklicznych podzielony był na dwa etapy:

a) cyklowanie przy stałej amplitudzie odkształceń całkowitych $\Delta\varepsilon$=±0.65 [%], prowadzone przy prędkości odkształcenia $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^{-4}$ [1/s],

b) cyklowanie przy malejącej amplitudzie odkształceń od wartości $\Delta\varepsilon$=±0.65 [%] do $\Delta\varepsilon$=±0 [%] przy prędkości odkształcenia malejącej na każdym cyklu ze względu na obniżanie wartości amplitudy przy zachowanym czasie wykonania cyklu.

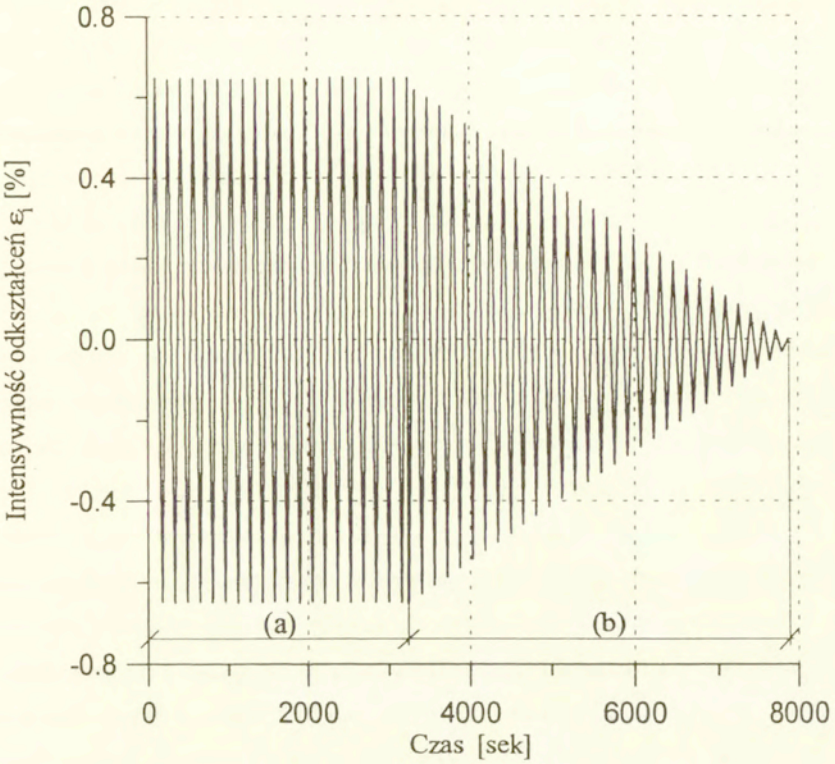
http://rcin.org.pl



Rys.5 Program obciążania próbki przy pojedynczym nakłuciu.

Program cykli stałych zawierał 81 ćwiartek. Celem jego było doprowadzenie do 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.

http://rcin.org.pl



Rys.6 Program obciążeń cyklicznych o stałej i malejącej amplitudzie realizowany dla każdego z ośmiu przyjętych kierunków.

Klasyczna metoda wyznaczenia krzywej szkieletowej materiału wymaga zastosowania bardzo wielu próbek i została szczegółowo omówiona we wstępie.

Dla ograniczenia ilości bardzo kosztownych i czasochłonnych testów potrzebnych do określenia kształtu krzywej szkieletowej metodą z wykorzystaniem wielu próbek powszechnie stosuje się sposoby uproszczone. W pracy zastosowano tzw. test dekrementalny wykonywany na jednej próbce, który polega na wcześniejszym osiągnięciu cyklu ustalonego przy wybranej stałej amplitudzie

http://rcin.org.pl

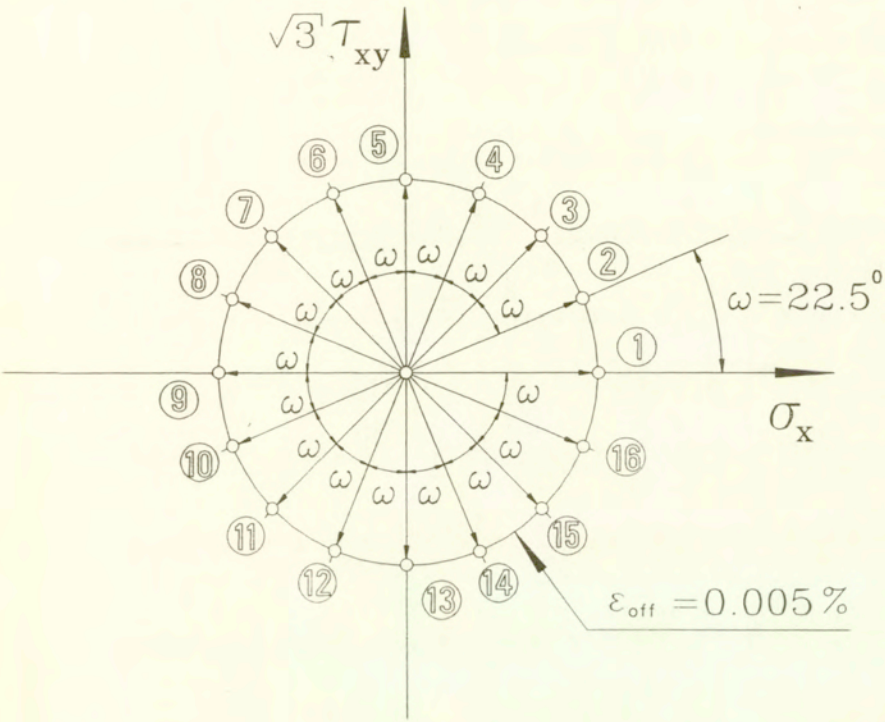
odkształceń a następnie cyklowaniu z malejącą liniowo do zera amplitudą odkształceń całkowitych. W części przyrostowo malejącej wykonywano 30 cykli i zapewniało to wystarczającą dokładność dla wyznaczenia krzywej cyklicznej. W tym przypadku krzywa szkieletowa stanowi zbiór punktów uzyskanych z odczytania wartości intensywności naprężenia i intensywności odkształcenia, odpowiadających ich wartościom maksymalnym w danym cyklu, a zatem uzyskiwana była z 30 punktów. Zaletą tej metody, obok minimalizacji kosztów wykonania badań, 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 ośmiu wybranych kierunków w płaszczyźnie (σ_x, τ_{xy}), co dało możliwość wyznaczenia na ich podstawie cyklicznych powierzchni plastyczności.

Trzeci etap programu eksperymentalnego obejmował określanie powierzchni plastyczności wykorzystując metodę sekwencyjnego obciążania jednej próbki zaraz po zakończeniu programu obciążeń cyklicznych. W tym przypadku procedura polegała na wyznaczeniu 16 punktów leżących na proporcjonalnych drogach obciążania równomiernie rozmieszczonych we wszystkich czterech ćwiartkach płaszczyzny (σ_x, τ_{xy}). Testy realizowano przy sterowaniu odkształceniem w czasie obciążania i przy sterowaniu obciążeniem w czasie procesu odciążania. Sposób określania offsetu schematycznie pokazano na rys.5, natomiast pełny przebieg procedury w przestrzeni naprężeń pokazano na rys.7. Numery od 1 do 16 odpowiadają kolejnym monotonicznym obciążeniom próbki do wartości intensywności odkształcenia trwałego 0.005 [%].

Reasumując, pełen program badań obejmował 8 próbek. Każda z nich była początkowo obciążana w jednych z ośmiu wybranych kierunków w celu wyznaczenia punktu pierwotnej powierzchni plastyczności, odciążana a następnie cyklowana, przy czym kierunek rozpoczęcia obciążania był zgodny z kierunkiem pierwszego nakłucia. Na płaszczyźnie odkształceń $\left(\varepsilon_x, \sqrt{\frac{3}{(1+\nu)^2}}\varepsilon_{xy}\right)$ punkty reprezentujące realizowane stany naprężenia przy cyklowaniu leżą na czterech prostoliniowych

http://rcin.org.pl

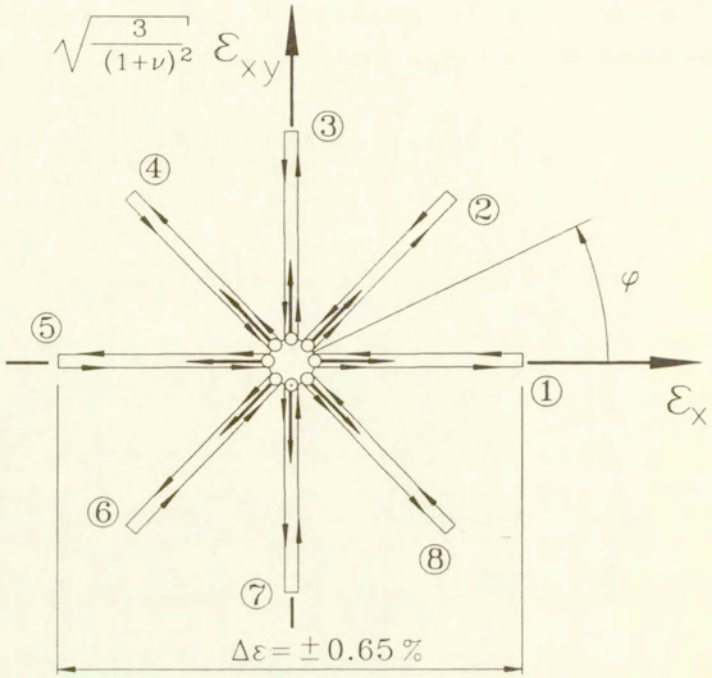
trajektoriach. Ze względu jednak na to, że dla każdej trajektorii obciążenia cykliczne różniły się zwrotem początkowego obciążania i możliwości wystąpienia anizotropowego zachowania materiału, rozważaniom poddano następujące przypadki $\varphi=0^{o}$; 45°; 90°; 135°; 180°; 225°; 270° i 315°, rys. 8. Na rysunku tym niezależne strzałki wychodzące z początku układu współrzędnych oznaczają kierunek wstępnego nakłucia dla otrzymania punktu powierzchni plastyczności oraz wskazują kierunek, od którego rozpoczynało się cyklowanie.



Rys.7 Program sekwencyjnego wyznaczania powierzchni plastyczności na jednej próbce.

http://rcin.org.pl

Po zakończeniu programu cyklicznego następowało sekwencyjne obciążanie w 16 kierunkach dla określenia wtórnej powierzchni plastyczności dla każdej testowanej próbki, przy czym kierunek pierwszego nakłucia był zawsze zgodny z kierunkiem rozpoczynania programu obciążeń cyklicznych.



Rys.8 Schemat pełnego programu testów przy obciążeniach cyklicznych.

2.6 Zależności definiujące stan naprężenia i stan odkształcenia

Naprężenie osiowe obliczano na podstawie następującego wzoru

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

http://rcin.org.pl

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, następującym związkiem

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

gdzie

M_S - moment skręcający próbkę.

Wartość intensywności naprężenia wyrażono zależnością

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

natomiast wartości intensywności odkształcenia zdefiniowano związkiem uwzględniającym współczynnik Poissona ν

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \frac{3}{(1+\nu)^2} \cdot \varepsilon_{xy}^2}, \tag{4}$$

gdzie: ε_x - odkształcenie osiowe

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

Dla badanej stali w zakresie odkształceń, dla których wyznaczano powierzchnię plastyczności, współczynnik Poissona wynosił 0.34.

http://rcin.org.pl

2.7 Warunek plastyczności

Wyniki z dostępnych publikacji wykazują, że dla dużej ilości materiałów izotropowych bardzo dobre potwierdzenie doświadczalne posiada warunek plastyczności Hubera - Misesa w postaci

$$S_{ij}S_{ij} = K^2, \tag{5}$$

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 (5), natomiast efekt Bauschingera powoduje, że rozszerzanie to nie może być symetryczne. Ze względu na ograniczenia jakie wprowadza warunek plastyczności wyrażony w formie zależności (5) oraz z uwagi na fakt, że w praktyce rzadko materiały są izotropowe, w niniejszej pracy w celu aproksymacji rezultatów doświadczalnych przyjęto anizotropowy warunek plastyczności, którego ogólna postać podana została przez Misesa [34] a w formie uwzględniającej człony liniowe przez Szczepińskiego [35]. Warunek przedstawiony w pracy [35] dla przypadku płaskiego stanu naprężenia realizowanego w prezentowanych badaniach, tj. gdy tylko $\sigma_x \neq 0$ i $\tau_{xy} \neq 0$, upraszcza się do postaci:

$$\begin{aligned} F(\sigma_{ij}) = (k_{12}+k_{31})\sigma_x^2 - 2k_{16}\sigma_x\tau_{xy} + k_{66}\tau_{xy}^2 + \\ (h_{31}-h_{12})\sigma_x + h_{66}\tau_{xy} = 1 \end{aligned} \tag{6}$$

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

http://rcin.org.pl

$$k_{12}+k_{31}=\frac{1}{Y_x Z_x}, \qquad h_{31}-h_{12}=\frac{1}{Y_x}-\frac{1}{Z_x},$$
$$k_{66}=\frac{1}{R_{xy}P_{xy}}, \qquad h_{66}=\frac{1}{R_{xy}}-\frac{1}{P_{xy}}, \tag{7}$$

gdzie Y_x - granica plastyczności przy rozciąganiu, Z_x - bezwzględna wartość granicy plastyczności przy ściskaniu, R_{xy} - granica plastyczności przy ścinaniu uzyskana dla dodatnich naprężeń τ_{xy}, P_{xy} - bezwzględna wartość granicy plastyczności przy ścinaniu uzyskana dla ujemnych naprężeń τ_{xy}. Jedynie 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 (6) przyjmuje postać

$$F(\sigma_{ij})=\frac{1}{Y_x Z_x}\sigma_x^2-2k_{16}\sigma_x\tau_{xy}+\frac{1}{R_{xy}P_{xy}}\tau_{xy}^2+$$
$$\left(\frac{1}{Y_x}-\frac{1}{Z_x}\right)\sigma_x+\left(\frac{1}{R_{xy}}-\frac{1}{P_{xy}}\right)\tau_{xy}=1 \tag{8}$$

W pracy wykorzystywano to równanie w nieco wygodniejszej następującej formie

$$F(\sigma_{ij})=A\sigma_x^2+2B\sigma_x\tau_{xy}+C\tau_{xy}^2+2D\sigma_x+2E\tau_{xy}=1, \tag{9}$$

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 eksperymantalnych od krzywej aproksymacji (9) osiągała minimum. Przyjęty warunek plastyczności umożliwiał określenie zmian wymiarów osi elipsy reprezentującej powierzchnię plastyczności, położenia jej środka, obrotu względem przyjętego układu

http://rcin.org.pl

współrzędnych, a także dał możliwość opisania efektu Bauschingera. Zależności wiążące współczynniki anizotropii A, B, C, D, E w warunku plastyczności (9) z wymiarami elipsy przedstawione zostały w pracy [36].

3. Wyniki badań

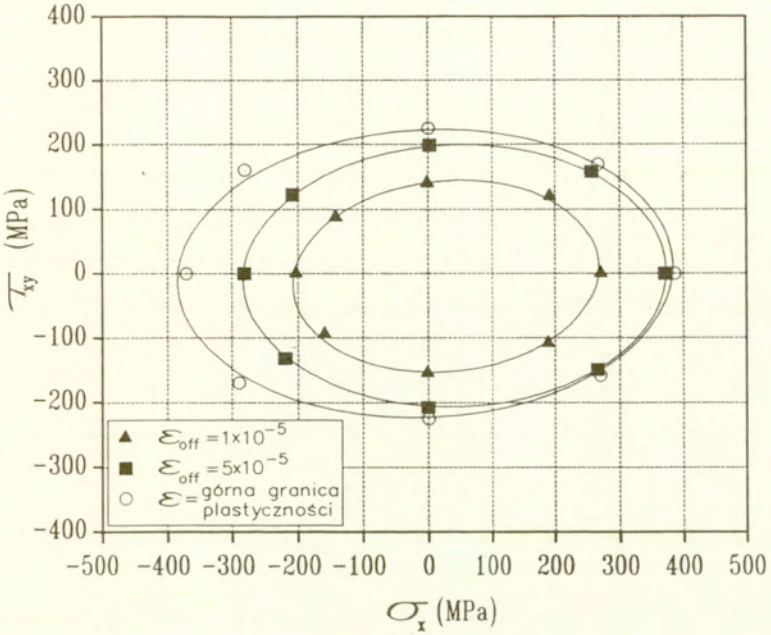
3.1 Wyniki dla materiału w stanie dostawy

Dla badanej stali 18G2A w stanie dostawy, w celu określenia początkowej powierzchni plastyczności, przeprowadzono monotoniczne obciążanie próbek wzdłuż ośmiu różnych dróg proporcjonalnych w dwuwymiarowej 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 [36], uzyskano odseparowanie odkształceń sprężystych od plastycznych i w efekcie przebiegi intensywności naprężeń jako funkcji intensywności odkształceń plastycznych Tak uzyskane wykresy aproksymowano krzywymi wykładniczymi postaci

$$\sigma_i = C \cdot (\varepsilon_i^{(p)})^n, \tag{10}$$

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 (9) tak, aby suma kwadratów odległości punktów doświadczalnych od krzywej aproksymacji osiągała minimum. Na rys. 9 przedstawiono tak uzyskane początkowe powierzchnie plastyczności dla

http://rcin.org.pl

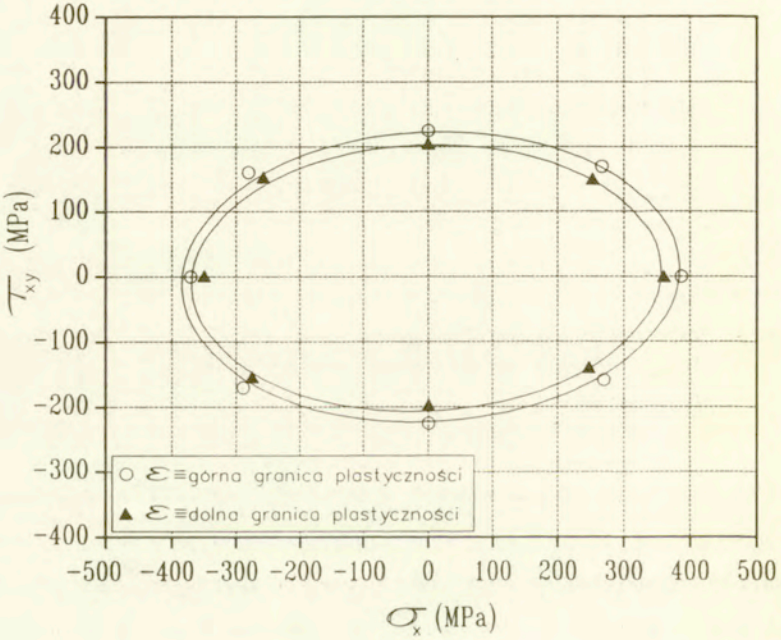


Rys.9 Powierzchnie plastyczności wyznaczone na ośmiu próbkach dla dwóch różnych offsetów na tle powierzchni odpowiadającej górnym granicom plastyczności.

dwóch definicji granicy plastyczności $\varepsilon_{off}=1\times10^{-5}$ i $\varepsilon_{off}=5\times10^{-5}$. 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

http://rcin.org.pl

własności mechanicznych badanej stali dla danej definicji offsetu nie potwierdziły jednak obserwacje górnej i dolnej granicy plastyczności uzyskane poprzez 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.



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

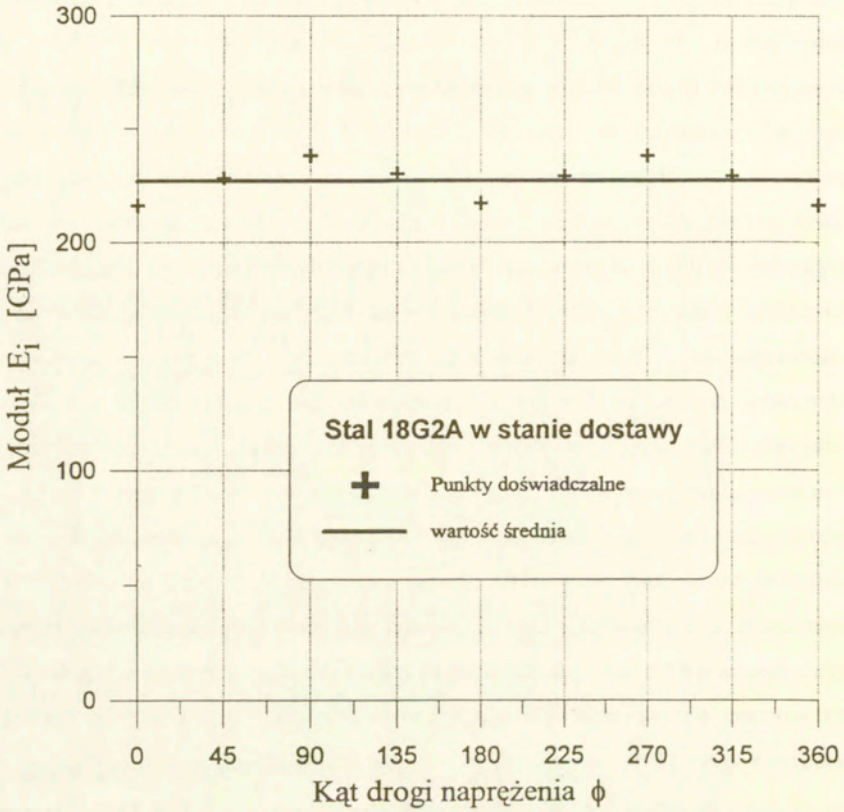
http://rcin.org.pl

Na rys.9 porównano powierzchnię odpowiadającą górnej granicy plastyczności z powierzchniami dla przyjętych definicji offsetów. Jak widać, powierzchnia dla $\varepsilon_{off}=5\times10^{-5}$ jest w części rozciągania niemal styczna z powierzchnią odpowiadajacą górnej granicy plastyczności, natomiast w części ściskania wymiar jej jest znacząco mniejszy. Wzajemne ułożenie wymienionych powierzchni wskazuje na pewien szczególny rodzaj anizotropii badanej stali, uwidocznionej dla konkretnych definicji offsetu. 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 osiągano dla różnych wielkości intensywności odkształcenia plastycznego. Reasumując można powiedzieć, że badana stal jest izotropowa w sensie wartości górnej i dolnej granicy plastyczności, natomiast dojście do wymienionych granic ma charakter anizotopowy, który jednak ujawnia się dopiero poza zakresem sprężystym. Wynika to z zestawienia modułów sprężystości podłużnej podanych w formie graficznej na rys.11 oraz liczbowo w tabeli 2 dla każdego rozpatrywanego kierunku. Ich wartości dla wszystkich podanych kierunków różnią się nieznacznie, chociaż widoczne na rys.11 regularne ułożenie punktów doświadczalnych wskazuje wyraźnie na cykliczny charakter wartości modułu sprężystości jako funkcji kąta kierunku drogi obciążania. Różnice jednak nie przekraczają 5 [%] w stosunku do wartości średniej i trudno na tej podstawie postulować występowanie anizotropii sprężystej. Dla udokumentowania takiego wniosku niezbędne są dodatkowe badania.

Tabela 2. Moduły sprężystości podłużnej dla 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

http://rcin.org.pl

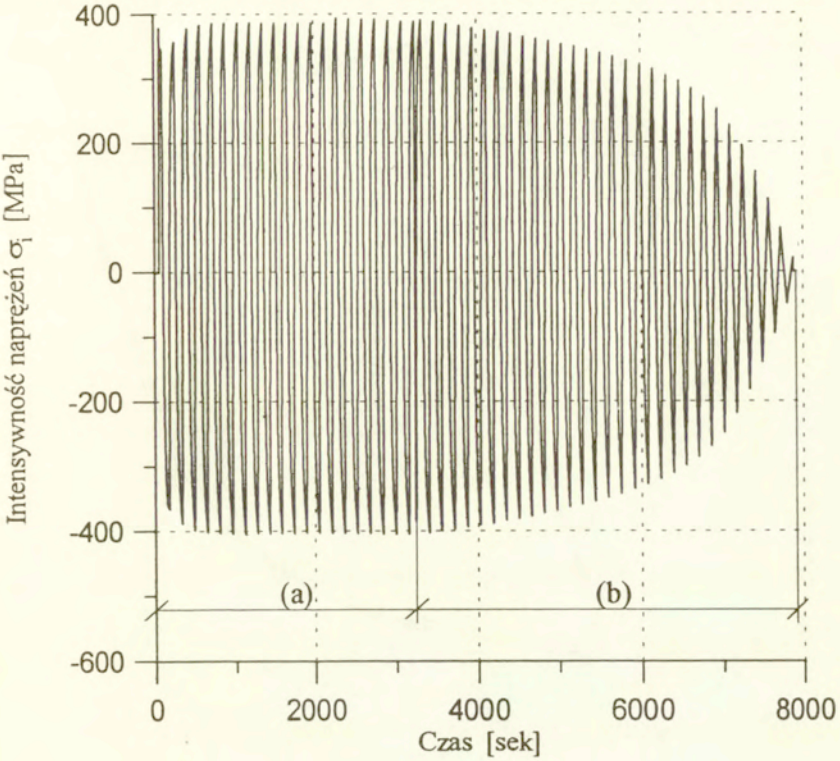


Rys.11 Moduły Younga dla stali 18G2A w stanie dostawy dla różnych kierunków w płaszczyźnie (σ_x, τ_{xy}).

3.2 Wyniki dla materiału po cyklowaniu

Deformacja cykliczna przeprowadzana była najpierw przy stałej amplitudzie $\Delta\varepsilon = \pm 0.65$ [%] aż do osiągnięcia cyklu ustalonego, a następnie realizowano program, w którym dla każdego cyklu równomiernie obniżano wartość amplitudy odkształceń aż

http://rcin.org.pl

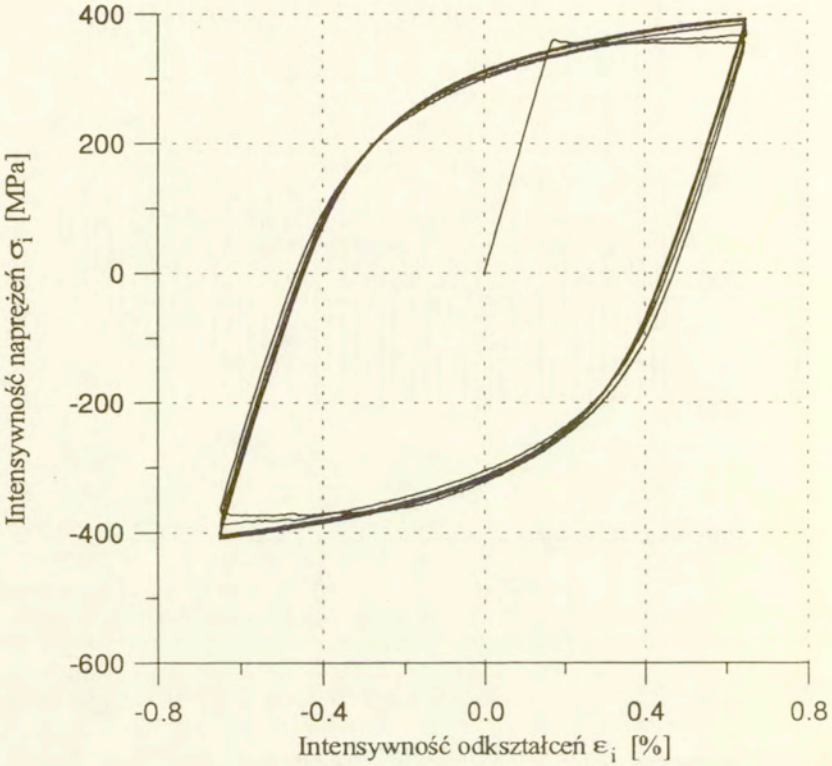


Rys.12 Przykładowa odpowiedź materiału, w naprężeniach jako funkcji czasu, na sterowany w odkształceniach program cykli o stałej i malejącej amplitudzie, pokazany na Rys.6.

do poziomu zerowego. Rys.12 ilustruje przykładowy przebieg odpowiedzi materiału, w postaci naprężeń jako funkcji czasu, na zadawaną deformację według schematu pokazanego na rys.6. Rys.13 przedstawia te rezultaty w płaszczyźnie naprężenie - odkształcenie po zakończeniu programu cykli o stałej amplitudzie. Osiągnięcie zamkniętego cyklu ustalonego nastąpiło stosunkowo szybko i już po 5 cyklach nie widać różnic pomiędzy pętlami histerezy plastycznej na wykresie naprężenie-

http://rcin.org.pl

odkształcenie. Podobny wynik otrzymano dla pozostałych siedmiu innych kierunków cyklowania.

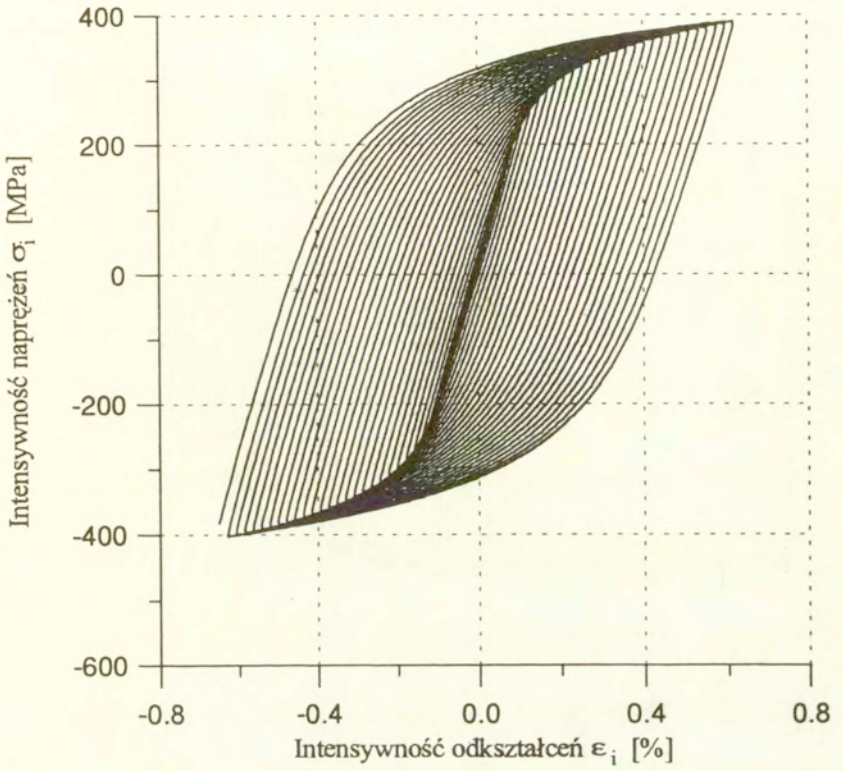


Rys.13 Przykładowy przebieg całego programu obciążeń cyklicznych o stałej amplitudzie dla jednego kierunku (0°) wyrażony w postaci wykresu zmian naprężenia w funkcji odkształcenia. Widoczna pętla cyklu ustalonego.

Na rys.14 przedstawiono rezultaty dla cykli o malejącej amplitudzie. Stanowi on jednocześnie ilustrację przyjętego sposobu otrzymywania krzywej szkieletowej, będącej zbiorem punktów wierzchołkowych dla kolejnych pętli programu cykli o malejącej amplitudzie. Zamieszczone przykładowe wyniki z cyklowań dotyczą próby

http://rcin.org.pl

oznaczonej na rys. 8 numerem 1, dla której cyklowanie rozpoczynano od kierunku rozciągania.

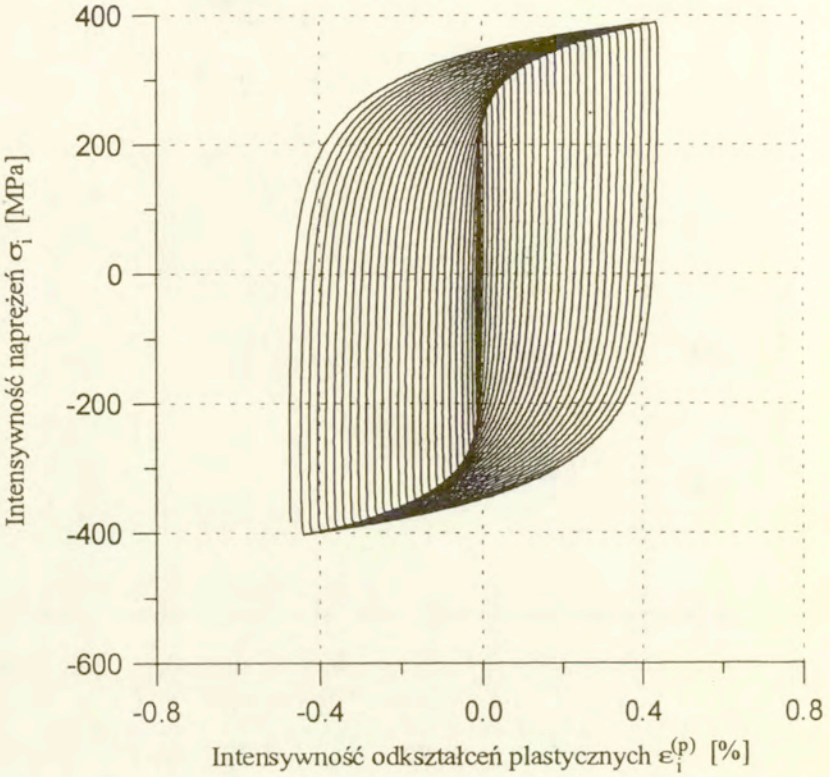


Rys.14 Przykładowy przebieg całego programu obciążeń cyklicznych o malejącej amplitudzie dla jednego kierunku, wyrażony w postaci wykresu zmian naprężenia w funkcji odkształcenia. Widoczna krzywa szkieletowa, będąca obrazem punktów wierzchołkowych przy przejściach z obciążania do odciążania.

Wyniki pokazane na rys. 14 przedstawiono w układzie naprężenie-odkształcenie całkowite. Przy pomocy programu DADISP wyniki te można automatycznie przetworzyć do postaci zależności od odkształceń plastycznych. Rezultat takiego

http://rcin.org.pl

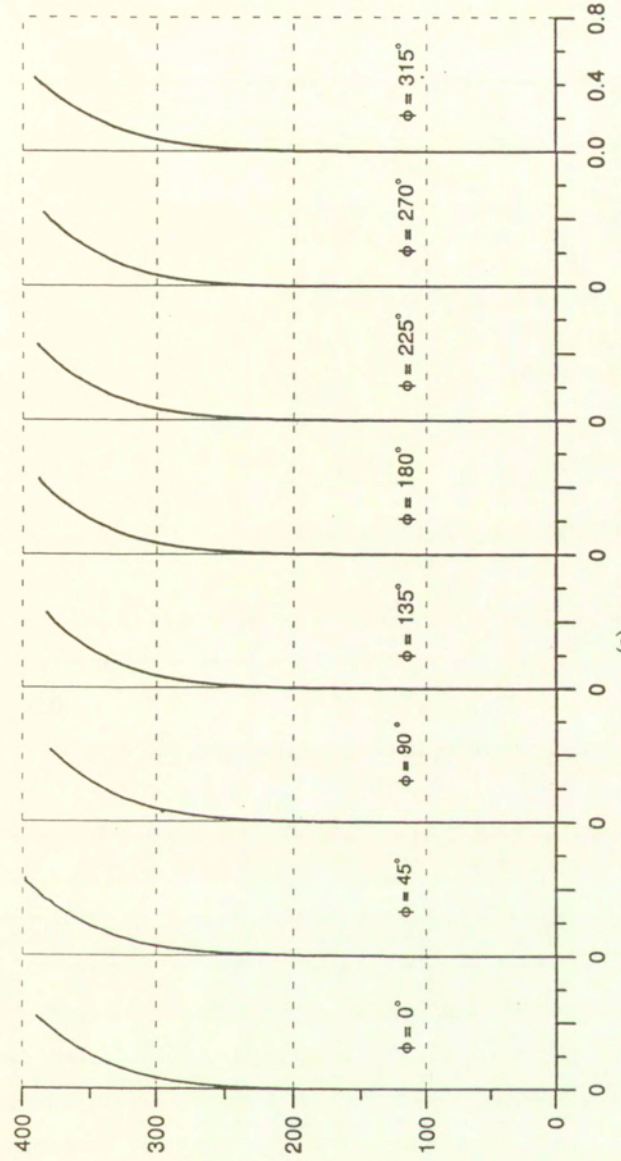
przetworzenia prezentowany jest na rys.15. Na rysunku tym również widać zarysowującą się krzywą szkieletową, dla której zostały odjęte odkształcenia sprężyste.



Rys.15 Przykładowy przebieg całego programu obciążeń cyklicznych o malejącej amplitudzie dla jednego kierunku, wyrażony w postaci wykresu zmian naprężenia w funkcji odkształcenia po odjęciu naprężeń sprężystych. Widoczna krzywa szkieletowa, będąca obrazem punktów wierzchołkowych przy przejściu z modu obciążania do modu odciążania.

Taka forma przedstawienia rezultatów upraszczała wyznaczanie punktów koniecznych do określenia cyklicznej powierzchni plastyczności dla z góry

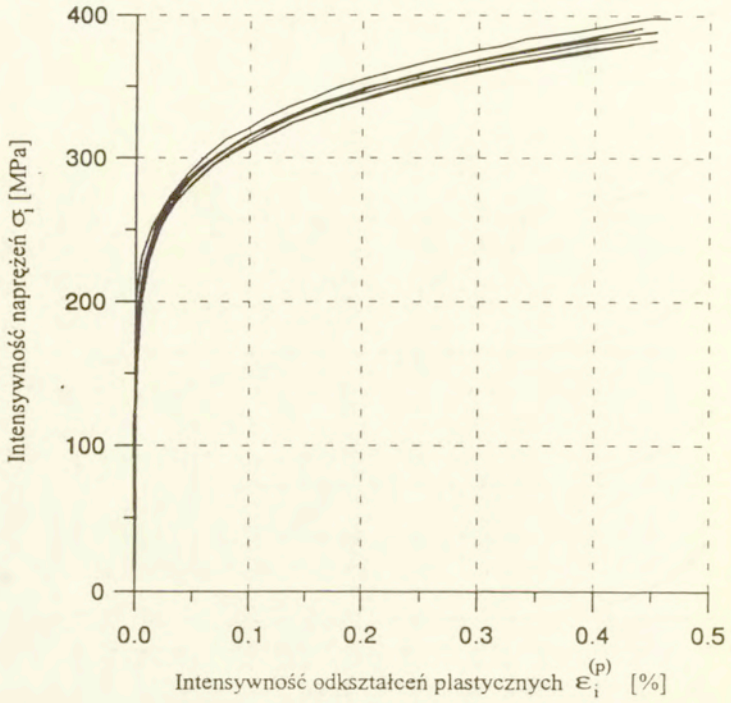
http://rcin.org.pl



Rys.16 Zestawienie krzywych szkieletowych dla wszystkich rozważanych kierunków cyklowania.

http://rcin.org.pl

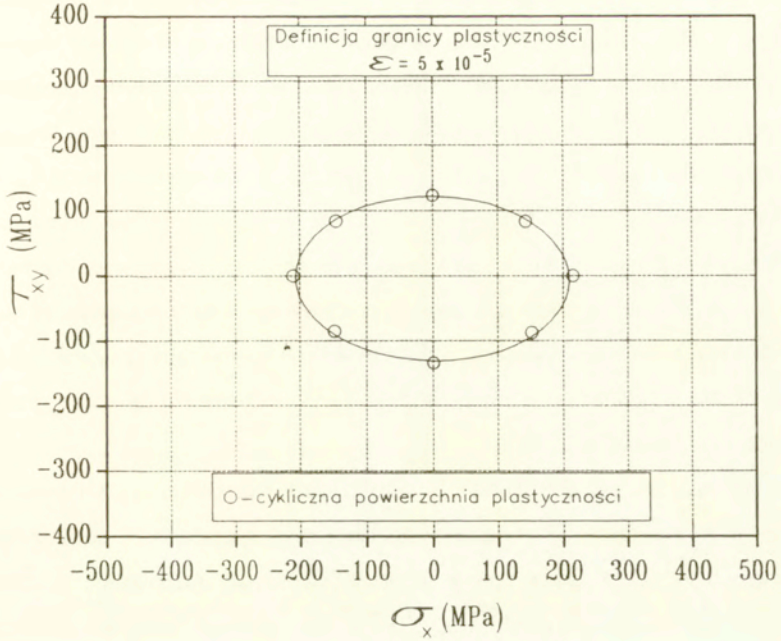
zdefiniowanego offsetu. Przebiegi krzywych szkieletowych uzyskanych po odjęciu odkształceń sprężystych zamieszczono na rys.16 dla ośmiu próbek deformowanych



Rys.17 Porównanie krzywych szkieletowych po odjęciu odkształceń sprężystych.

według programu pokazanego na rys.8. Na kolejnym rysunku, rys.17, porównano otrzymane krzywe szkieletowe. Łatwo zauważyć, że ze stosunkowo dużą dokładnością krzywe te pokrywają się, w szczególności w zakresie małych odkształceń plastycznych (0.01 [%]). Dla omawianych krzywych szkieletowych określono cykliczną powierzchnię graniczną, rys.18, odpowiadającą amplitudzie cyklicznych odkształceń trwałych $\varepsilon_{off}=5\times10^{-5}$, aby umożliwić porównanie z początkową powierzchnią plastyczności.

http://rcin.org.pl



Rys.18 Cykliczna powierzchnia plastyczności.

Tego typu powierzchnia graniczna reprezentuje zdolność badanej stali do zmiany parametrów mechanicznych pod wpływem cyklicznej deformacji w różnych kierunkach, w płaszczyźnie naprężeń (σ_x, τ_{xy}) i może być oczywiście określana dla całego zakresu amplitud, w którym wyznaczane są krzywe szkieletowe. W pracy tej ograniczono się jednak, ze względu na jej zakres i cel, do analizy jednej, wybranej dla celów porównawczych, cyklicznej powierzchni plastyczności. Z kształtu i wymiarów tej powierzchni wynika, że historia cyklicznych odkształceń plastycznych zadawana w różnych ośmiu kierunkach wywoływała w testowanym materiale ten sam stopień osłabienia, niezależnie od tego, że początkowe powierzchnie plastyczności

http://rcin.org.pl

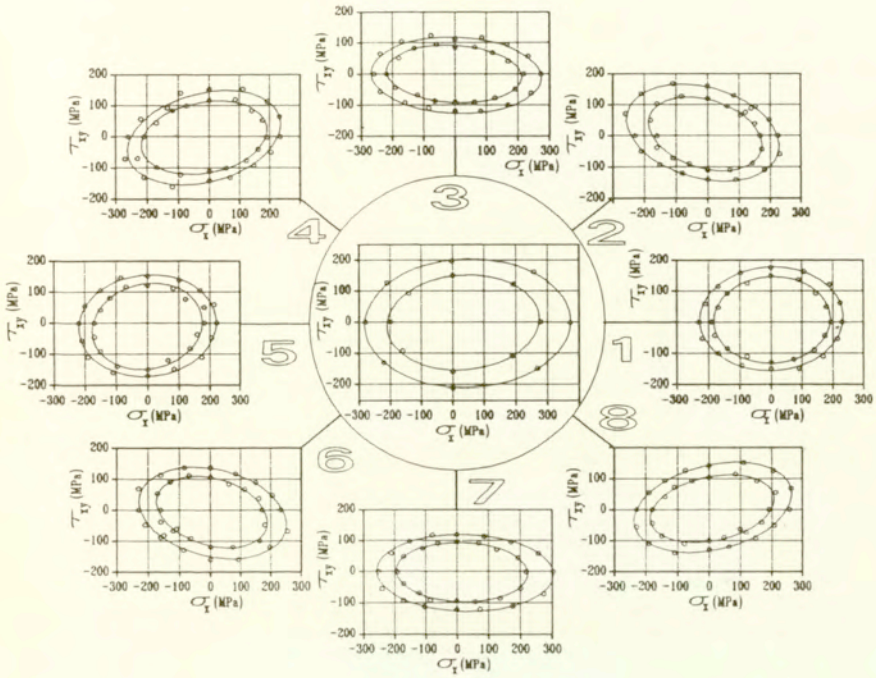
dla offsetów 1×10^{-5}, 5×10^{-5} wykazywały anizotropię materiału w stanie dostawy. Z analizy wymiarów cyklicznej powierzchni plastyczności wynika, że anizotropia początkowa zostawała zapominana w procesie cyklowania. A zatem materiał wykazywał pamięć maksymalnych przeciążeń w prowadzonych procesach plastycznego cyklicznego odkształcania w równym stopniu dla każdego rozpatrywanego kierunku. Efekt ten jest zgodny z podejściem teoretycznym prezentowanym w pracy Mroza [2]. Z rys.18 widać, że środek otrzymanej powierzchni pokrywa się z dużą dokładnością ze środkiem układu współrzędnych. Interesujący wydaje się także fakt, że stosunek wielkiej i małej osi elipsy jest bliski wartości wynikającej z kryterium plastyczności Hubera-Misesa i wynosi 1.65. Stosunek ten dla materiału w stanie początkowym, w odniesieniu do dolnej granicy plastyczności, wynosił 1.78.

Dla rozważanych ośmiu próbek, z których każda była poddana różniącemu się kierunkiem programowi obciążeń cyklicznych, wyznaczano powierzchnie plastyczności metodą sekwencyjną. Szersze omówienie rezultatów tej części programu badań wybiega poza ramy tej pracy i jest tematem oddzielnej publikacji [29]. Ważniejsze jednak wyniki i wnioski zostaną syntetycznie streszczone i przedstawione na rysunku zestawieniowym, rys.19. Powierzchnie dla materiału po cyklowaniu 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, że na kształt powierzchni plastyczności przy danym kierunku nie miał większego wpływu zwrot rozpoczynania programu obciążeń cyklicznych. Innymi słowy kształt i wymiary powierzchni uzyskanych przykładowo dla kierunku cyklowania "rozciąganie - ściskanie" zarówno gdy program rozpoczynano od rozciągania jak i od ściskania był niemal identyczny. To samo stwierdzenie dotyczy pozostałych realizowanych w programie kierunków.

http://rcin.org.pl

Zwrot obciążeń cyklicznych przy rozpoczynaniu programu cyklowania miał jednak wpływ na położenie środka powierzchni plastyczności, rys.20.

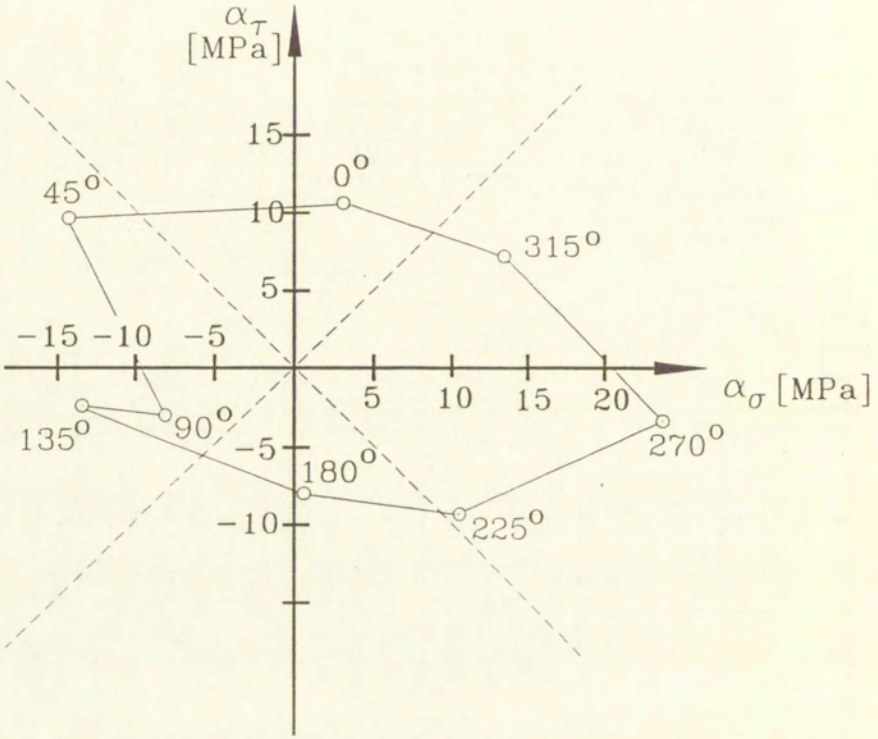
Programy obciążeń cyklicznych, realizowane dla kierunków φ = 45°; 135°; 225°; 315°, powodowały stosunkowo duży obrót powierzchni plastyczności w porównaniu do powierzchni dla materiału w stanie wyjściowym.



Rys.19 Zestawienie powierzchni plastyczności dla 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 dla materiału cyklowanego w kierunkach odpowiednio od 0 do 315° (wzrostowi numeru o 1 odpowiada wzrost kąta o 45°). W środku umieszczono powierzchnie otrzymane dla materiału w stanie dostawy uzyskane w drodze testowania wielu próbek. Zestawienie obejmuje powierzchnie dla offsetów: 1×10^{-5}, 5×10^{-5}.

http://rcin.org.pl

Fakt ten potwierdza jednak tylko wniosek przedstawiony wcześniej, że stopień osłabienia materiału był największy na kierunkach pokrywających się z kierunkami programu cyklicznego.



Rys.20 Ilustracja ewolucji środka powierzchni plastyczności względem początku układu współrzędnych dla materiału cyklowanego według różnych dróg obciążenia schematycznie pokazanych na rysunku 8.

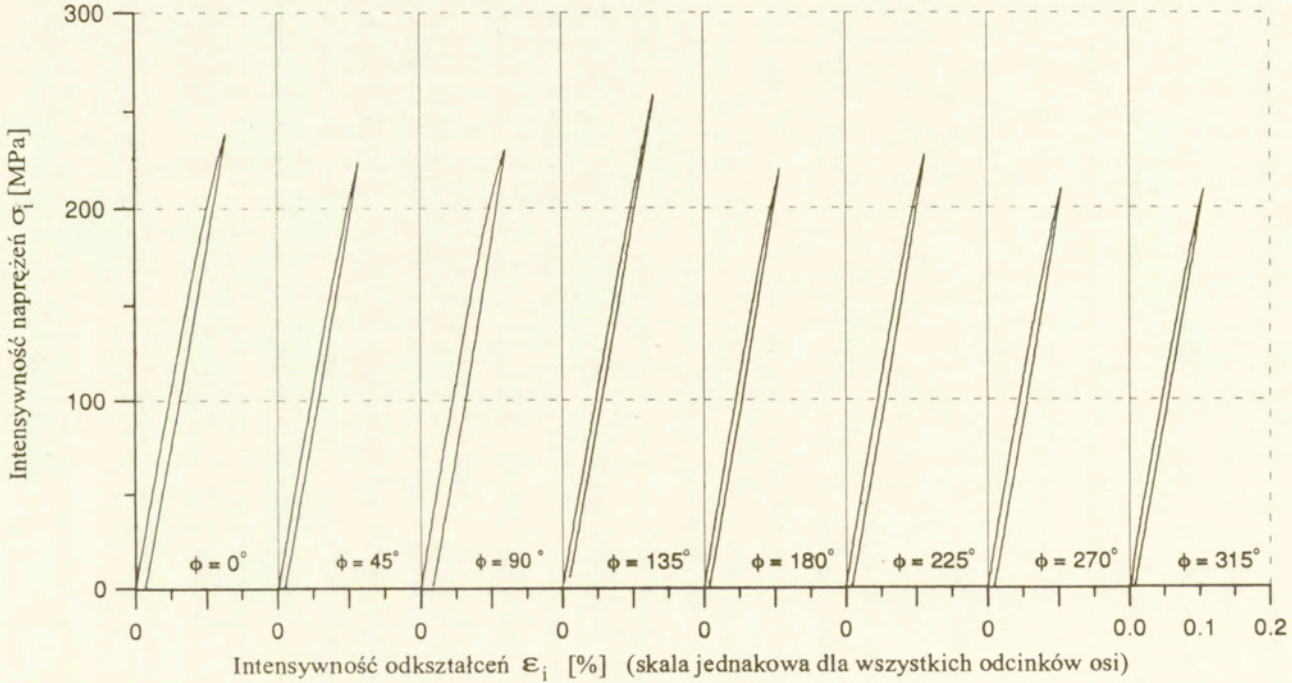
http://rcin.org.pl

Rys.19 przedstawia wszystkie powierzchnie plastyczności dla badanej stali odpowiadające odkształceniom trwałym $\varepsilon_{off}=1\times10^{-5}$ i $\varepsilon_{off}=5\times10^{-5}$. W środku zaprezentowano powierzchnie dla materiału w stanie dostawy, wyznaczone metodą 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 zwrot pierwszego półcyklu i są one zgodne z numerami na schemacie podanym na rys. 8.

4. Analiza rezultatów doświadczalnych

Jak już wcześniej wspomniano, badana stal wykazywała jednakowy stopień osłabienia dla każdego rozpatrywanego w pracy kierunku rozpoczynania deformacji cyklicznej i przyjętego do analizy wyników maksymalnego odkształcenia trwałego wynoszącego 0.005 [%]. Ilustrację takiego zachowania stanowi cykliczna powierzchnia plastyczności. Dla znalezienia potwierdzenia słuszności wniosków wyciągniętych na podstawie kształtu i wymiarów cyklicznej powierzchni plastyczności, określonej dla wybranej amplitudy odkształceń trwałych z krzywych szkieletowych, zbudowano powierzchnię będącą obwiednią wszystkich powierzchni plastyczności określonych dla materiału po programie obciążeń cyklicznych. Powierzchnia ta została określona z wyników dla ośmiu próbek, w oparciu o wykresy naprężenie - odkształcenie uzyskane z pierwszych nakłuć każdej próbki. Nakłucia te uzyskiwano w procedurze sekwencyjnego obciążania każdej próbki, po programie odpowiadających jej obciążeń cyklicznych. Kierunek tego nakłucia zawsze pokrywał się ze zwrotem pierwszego półcyklu odpowiadających wstępnych obciążeń cyklicznych. A zatem przykładowo dla materiału poddanemu cyklowaniu przy $\varphi=0^{o}$ wyznaczanie powierzchni po cyklach metodą sekwencyjną rozpoczynało się od nakłucia w tym samym kierunku i do dalszego procesu związanego z wyznaczaniem opisywanej obwiedni brano wynik właśnie z tego obciążania. Podobnie postępowano dla wszystkich pozostałych kierunków określonych przez kąt φ.

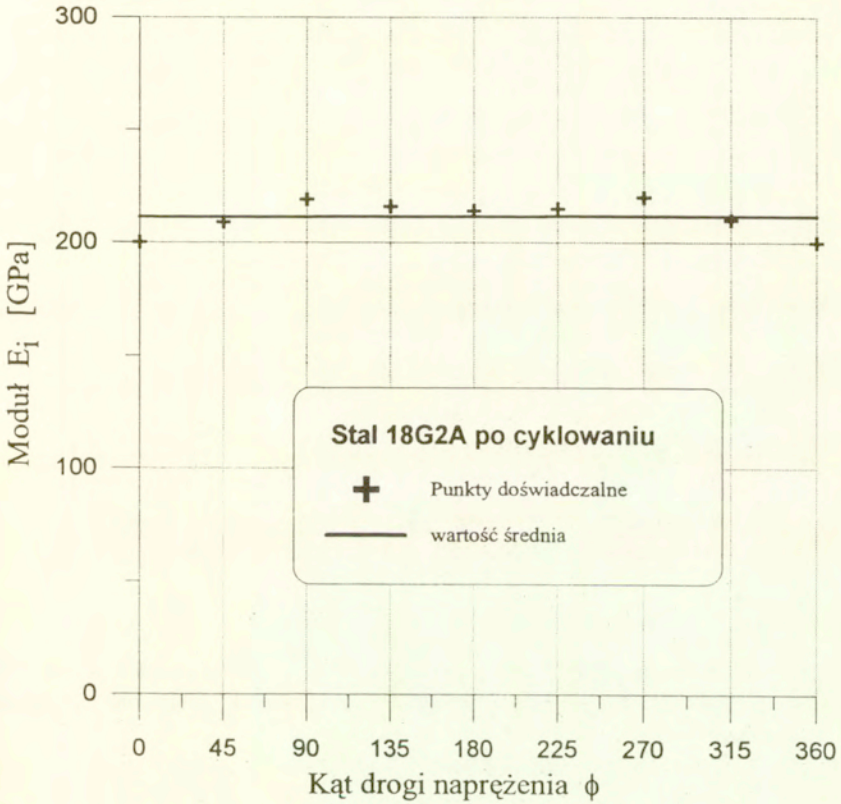
http://rcin.org.pl



Rys.21 Wykresy intensywność naprężenia - intensywność odkształcenia dla pierwszych nakłuć w metodzie sekwencyjnego określania powierzchni plastyczności dla materiału wstępnie zdeformowanego w procesie obciążania cyklicznego przy różnych jego kierunkach określonych przez kąt φ .

http://rcin.org.pl

Wykresy naprężenie - odkształcenie pochodzące z pierwszych nakłuć w metodzie sekwencyjnego wyznaczania powierzchni pokazane są na rys.21. Dane dotyczące modułów sprężystości dla tych nakłuć zawiera tabela 3, natomiast w formie graficznej zamieszczono je na rys.22. Wartości modułu Younga, w porównaniu do analogicznych wartości dla tego samego materiału będącego w stanie dostawy, uległy obniżeniu. Mamy więc tu stosunkowo wyraźny efekt osłabienia sprężystego wskutek cyklowania materiału, przy czym zachowana jest również podobna cykliczna zależność modułu sprężystości jako funkcji kąta kierunku drogi obciążania jak dla



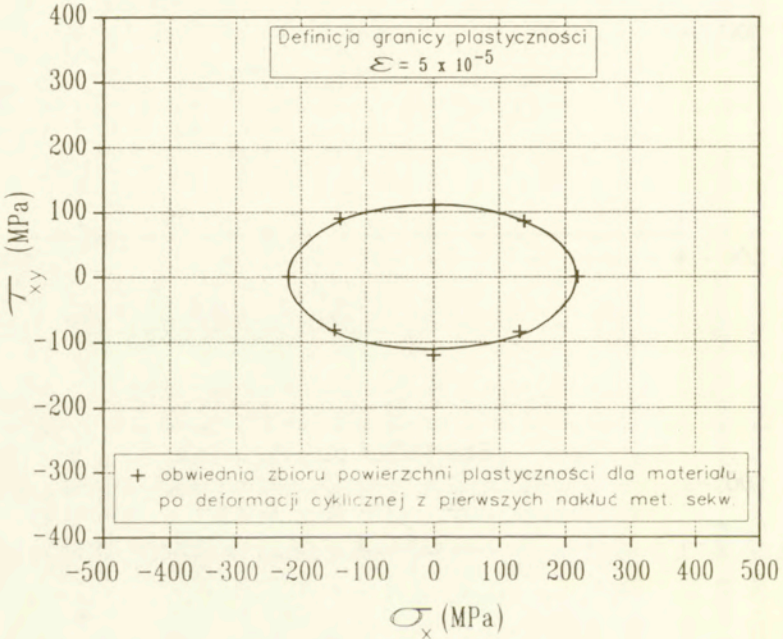
Rys.22 Moduły Younga dla pierwszych nakłuć materiału po jednakowym programie obciążeń cyklicznych.

http://rcin.org.pl

materiału w stanie dostawy.

Tabela 3. Moduły Younga dla pierwszych nakłuć materiału po jednakowym programie obciążeń cyklicznych.

φ [deg]	0	45	90	135	180	225	270	315
E_i [GPa]	200	209	219	216	214	215	220	210

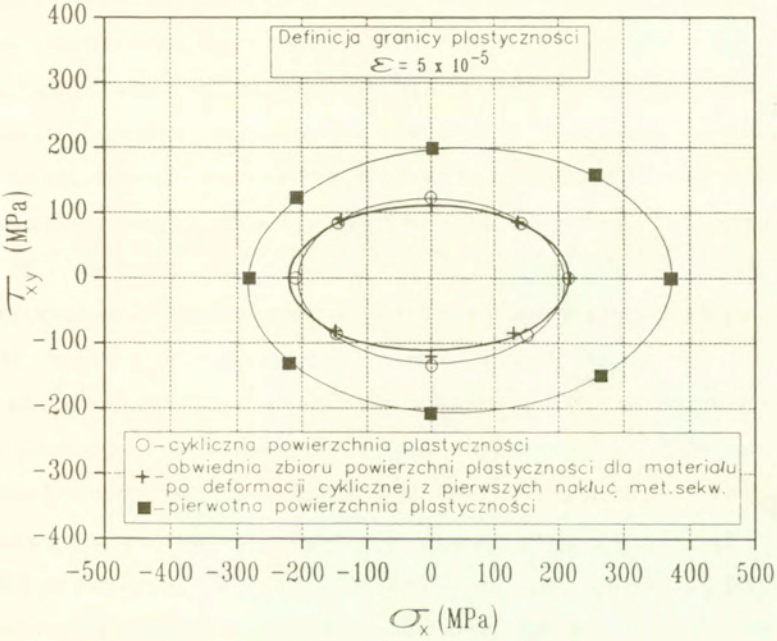


Rys.23 Graniczna powierzchnia plastyczności odwzorowująca kierunki maksymalnego osłabienia materiału na skutek programu obciążeń cyklicznych.

Przyjmując definicję uplastycznienia $\varepsilon_{off}=5\times10^{-5}$ otrzymano powierzchnię będącą obwiednią dla punktów doświadczalnych ze wszystkich powierzchni plastyczności

http://rcin.org.pl

dla stali po programie obciążeń cyklicznych, rys.23. Innymi słowy w opisywanej powierzchni zawierało się po jednym punkcie doświadczalnym, wziętym z każdej powierzchni sekwencyjnej, a jego położenie wyznaczało kierunek wcześniejszego cyklowania jak i kierunek nakłucia. W ten sposób wyznaczona powierzchnia reprezentuje w przypadku badanej stali stopień maksymalnego osłabienia materiału, które miało miejsce na kierunku prowadzonej deformacji cyklicznej. Powierzchnię tę porównano z cykliczną powierzchnią plastyczności otrzymaną na podstawie krzywych szkieletowych, rys.24.



Rys.24 Porównanie cyklicznej powierzchni plastyczności z powierzchnią maksymalnego osłabienia na tle pierwotnej powierzchni plastyczności materiału w stanie dostawy.

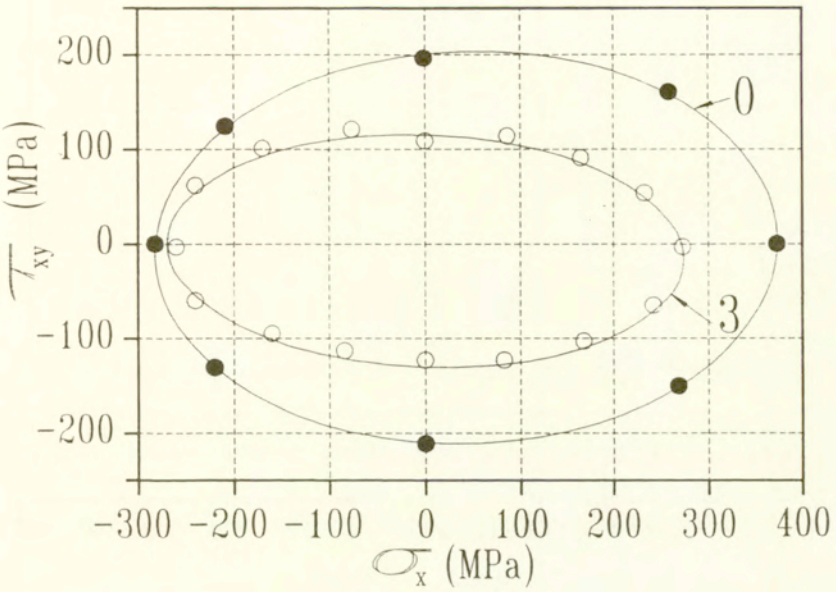
http://rcin.org.pl

Jak widać, uzyskano dużą zgodność zarówno położenia jak i wymiarów obu powierzchni. Potwierdza to zatem równoważność i przydatność obydwu metod do opisu cyklicznych własności badanego materiału w stanie ustabilizowanej deformacji w płaskim stanie naprężenia. Dodatkowo na rysunku tym zamieszczono powierzchnię dla materiału w stanie dostawy w celu uwidocznienia stopnia zmian własności materiału pod wpływem deformacji cyklicznej odpowiadającej odkształceniu trwałemu 0.005 [%].

Analizując kształt powierzchni po obciążeniach cyklicznych, prezentowanych na rysunku zbiorczym (rys.19), interesujące wydaje się także globalne rozpatrzenie zachowania materiału na kierunkach prostopadłych do kierunków prowadzonej deformacji cyklicznej. Jednostkowa analiza prowadzona dla każdego kierunku w oparciu o wyznaczone powierzchnie wykazuje, że na kierunkach prostopadłych do poprzedzającego programu obciążeń cyklicznych również ma miejsce osłabienie materiału, jednak o niewielkiej wartości. Przykładowo przedstawiono to na rys. 25, na którym porównane są powierzchnia materiału w stanie dostawy i powierzchnia dla materiału cyklowanego w kierunku dodatniego skręcania ($\varphi=90^{o}$) przy $\varepsilon_{off}=5\times10^{-5}$. Widać wyraźnie, że wielka oś powierzchni po cyklowaniu (tj. oś prostopadła do kierunku deformacji cyklicznej) jest tylko nieco mniejsza od analogicznej osi powierzchni dla materiału w stanie dostawy. Całościowej analizy można dokonać budując kolejną powierzchnię graniczną dla materiału po cyklowaniu z punktów sekwencyjnych powierzchni plastyczności obróconych o 90°, przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, względem odpowiadającego danej powierzchni sekwencyjnej procesu wstępnego cyklowania. A zatem rozpatrując powierzchnię wtórną dla materiału po cyklowaniu rozpoczynanym w kierunku 90°, pokazaną na rys.25, do konstrukcji takiej powierzchni granicznej należy wziąć punkt odpowiadający kierunkowi $\varphi=180^{o}$. Dla innych kierunków cyklowania należy postąpić w analogiczny

http://rcin.org.pl

sposób. Rys.26 zawiera tak otrzymaną obwiednię dla definicji offsetu $\varepsilon_{off}=5\times10^{-5}$, która reprezentuje dla testowanego materiału kierunki minimalnego osłabienia.

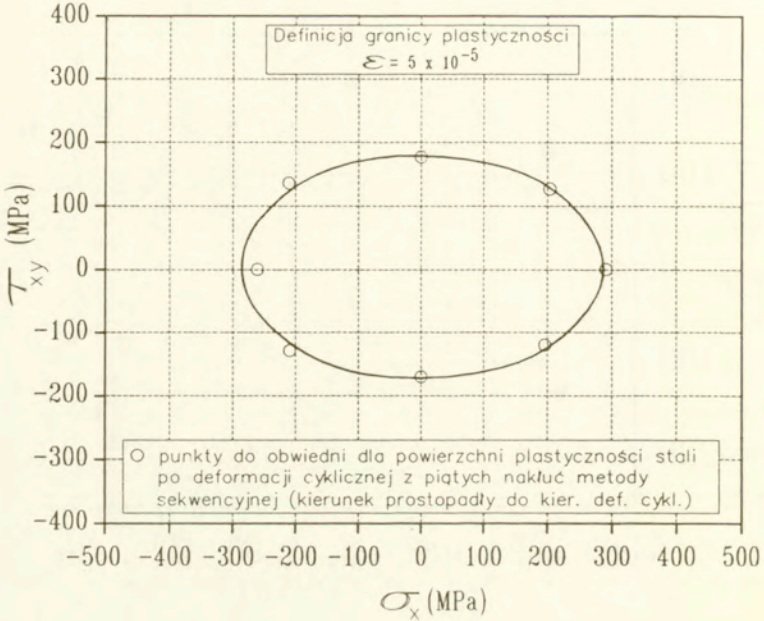


Rys.25 Porównanie początkowej powierzchni plastyczności określonej z ośmiu próbek obciążanych dla różnych dróg proporcjonalnych z powierzchnią plastyczności wyznaczoną sekwencyjnie na jednej próbce dla materiału po programie obciążeń cyklicznych rozpoczynanych od kierunku 90°.

Należy w tym miejscu podkreślić, że powierzchnia ta nie jest wyznaczana z pierwszych nakłuć metody sekwencyjnej jak w przypadku powierzchni granicznej dla kierunków maksymalnego osłabienia, ale w każdym przypadku z piątego nakłucia. A

http://rcin.org.pl

zatem uzyskany obraz zachowania materiału po cyklach dodatkowo obarczony jest w tym przypadku historią czterech nakłuć sekwencyjnego wyznaczania powierzchni plastyczności.

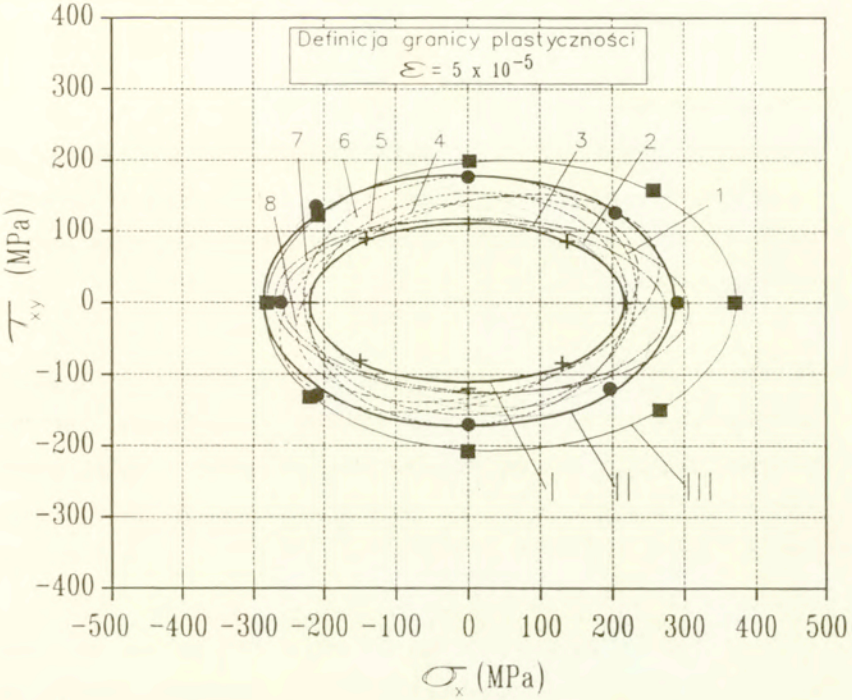


Rys.26 Graniczna powierzchnia plastyczności odwzorowująca kierunki minimalnego osłabienia materiału na skutek programu obciążeń cyklicznych.

Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt, że wymiary tej powierzchni, podobnie jak w przypadku powierzchni granicznej dla maksymalnego osłabienia, wskazują na jednakowy poziom osłabienia dla wszystkich analizowanych kierunków. Na rys.27 powierzchnię tę (II) porównano z obwiednią dla kierunków maksymalnego osłabienia (I). Obie powierzchnie są z dużą dokładnością współśrodkowe i stosunkowo dobrze

http://rcin.org.pl

ilustrują górne i dolne granice osłabienia materiału w stanie ustabilizowanej, cyklicznej deformacji odpowiadającej odkształceniu trwałemu 0.005 [%].



Rys.27 Zestawienie powierzchni: I - maksymalnego osłabienia, II - minimalnego osłabienia, III - dla materiału w stanie dostawy określonej przez monotoniczne obciążanie kilku próbek w różnych kierunkach oraz powierzchni dla materiału poddanemu obciążeniom cyklicznym o różnej orientacji (numery od 1 do 8 odpowiadają numerom realizowanych prób według programu pokazanego na Rys.8)

Dla lepszego zrozumienia konstrukcji wyznaczonych powierzchni granicznych dodatkowo liniami cienkimi zaznaczono zarysy powierzchni plastyczności po deformacji cyklicznej rozpoczynającej się od kierunku $\varphi=0^o$ (1), $\varphi=45^o$ (2), $\varphi=90^o$ (3), $\varphi=135^o$ (4), $\varphi=180^o$ (5), $\varphi=225^o$ (6), $\varphi=270^o$ (7), $\varphi=315^o$ (8). Oprócz tego dla

http://rcin.org.pl

porównania wykreślono pierwotną powierzchnię plastyczności (III) wyznaczoną metodą obciążania wielu próbek dla stali 18G2A w stanie dostawy. Wszystkie prezentowane na tym rysunku powierzchnie określono dla definicji granicy plastyczności $\varepsilon_{off}=5\times10^{-5}$.

5. Wnioski końcowe

Zaprezentowana praca dotyczy badań doświadczalnych niskostopowej stali konstrukcyjnej 18G2A w stanie dostawy oraz poddanej deformacji cyklicznej. Zrealizowany program doświadczalny pozwala sformułować następujące wnioski i spostrzeżenia:

1. Materiał w stanie dostawy cechował się wyraźną górną i dolną granicą plastyczności we wszystkich kierunkach obciążania w rozpatrywanej przestrzeni naprężeń (σ_x, τ_{xy}). Punkty doświadczalne dla górnej i dolnej granicy plastyczności są dobrze opisane izotropowym warunkiem plastyczności Hubera-Misesa.

2. Górne granice plastyczności badanego materiału w stanie dostawy dla różnych kierunków obciążania odpowiadają różnym wielkościom efektywnego odkształcenia plastycznego.

3. Kształt zależności efektywnych naprężeń jako funkcji efektywnych odkształceń plastycznych, bezpośrednio przed górną granicą plastyczności, zależy od kierunku obciążania w rozpatrywanej przestrzeni naprężeń. W konsekwencji tego wartość umownej granicy plastyczności odpowiadającej mniejszej wartości odkształceń plastycznych od wartości górnej granicy plastyczności zależą od kierunku obciążania. Przy definicji granicy plastyczności 0.005 [%] różnice w wielkości naprężenia dla rozpartywanych kierunków przekraczały 25 [%], a

http://rcin.org.pl

aproksymacja takiej powierzchni plastyczności wskazuje na anizotropowy charakter właściwości materiału.

4. Cykliczne deformacje plastyczne w określonym kierunku obciążania prowadziły do ukształtowania się anizotropowych własności mechanicznych.

5. Zaproponowana koncepcja cyklicznej powierzchni granicznej, nazywanej również zamiennie cykliczną powierzchnią plastyczności, reprezentuje zdolność materiału do zmiany własności mechanicznych, w przypadku badanej stali - osłabienia, pod wpływem cyklicznej deformacji w różnych kierunkach płaszczyzny naprężeń (σ_x, τ_{xy}). Z analizy wymiarów otrzymanej powierzchni wynika, że badana stal wykazuje jednakowy stopień osłabienia dla wszystkich badanych kierunków deformacji cyklicznej i zapomina początkową anizotropię pod wpływem nabytej historii odkształceń.

6. Stal 18G2A po wstępnej deformacji cyklicznej wykazywała efekt osłabienia, przy czym maksymalny jego stopień obserwowano dla wtórnych sekwencyjnych powierzchni plastyczności na kierunkach zgodnych z kierunkami prowadzonego obciążania cyklicznego.

7. Wprowadzone obwiednie maksymalnego i minimalnego osłabienia dla powierzchni plastyczności w następstwie poprzedzających obciążeń cyklicznych, w różnych kierunkach płaszczyzny naprężeń, stanowią dolne i górne oszacowanie osłabienia badanego materiału.

6. Podziękowania

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

http://rcin.org.pl

7. Spis literatury

1. M. Śliwowski, Behaviour of stress-strain diagrams for cyclic loadings, Biul. PAN, vol. XXVII, **No 2**, 115-123, 1979.

2. Z. Mróz, On generalized kinematic hardening rule with memory of maximal prestress, J.Mech.Appl., **5**, 241-260, 1981.

3. H.S.Lamba, O.M.Sidebottom, Cyclic plasticity for nonproportional paths, ASME J. Eng. Mat. Tech., **100**, 96-111,1978.

4. E. Tanaka, S. Murakami, M. Ooka, Effects of plastic strain amplitudes on non-proportional cyclic plasticity, Acta Mech., **57,** 167-182, 1985.

5. E. Tanaka, S. Murakami, M. Ooka, Effects of strain path shapes on non-proportional cyclic plasticity, J. Mech. Phys. Solids, **33**, 559-575,1985.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. W. Trąmpczyński, The experimental verification of the evolution of kinematic and isotropic hardening in cyclic plasticity, J. Mech. Phys. Solids, **36**, 417-441,1988.

10. 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.

http://rcin.org.pl

11. 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.

12. J. Lipkin, J.C. Swearengen, On the Subsequent Yielding of an Aluminium Alloy Following Cyclic Prestraining, Metallurgical Transaction A, **6A**, 167-177, 1975.

13. 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.

14 Chr. Boller, T. Seeger, Materials Data For Cyclic Loading, Part A: Unalloyed Steels (Materials Science Monographs, 42A), Elsevier, Amsterdam-Oxford - New York - Tokyo 1987.

15. R. Marjanovic, W. Szczepiński, Yield Surfaces of the M-63 Brass Prestrained by Cyclic Biaxial Loading, Arch. Mech., **26**, 311-320, 1974.

16. J. Miastkowski, Yield Surface of Material Subjected to Combined Cyclic Loading, Arch. Mech., **30**, 203-215, 1978.

17. H. Ishikawa, K. Sasaki, Stress-Strain Relations of SUS304 Stainless Steel After Cyclic Preloading, J. Eng. Mat. Techn., **111**, 417-423, 1989.

18. H. Ishikawa, K. Sasaki, Yield Surfaces of SUS304 Under Cyclic Loading, J. Eng. Mat. Techn., **110**, 364-371, 1988.

19. P.W. Landgraf, JoDean Morrow, T. Endo, Determination of the Cyclic Stress-Strain Curve, Journal of Materials, **4**, 1, 176-188, 1969.

20. 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.

21. 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.

http://rcin.org.pl

22. D. L. McDowell, Multiaxial nonproportional cyclic deformation, Report No. 102, Dept. of Mech. and Industrial Eng.,Univ. of Illinois, Urbana, May 1981.

23. D. L. McDowell, A two surface model for transient nonproportional cyclic plasticity, ASME J. Appl. Mech., **52**,298-308, 1985

24. Z. Mróz, On the description of anisotropic workhardening, J. Mech. Phys. Solids, **15**, 163-175,1967

25. B.H. Jones, Assessing Instability of Thin-walled Tubes under Biaxial Stresses in the Plastic Range, Experimental Mechanics, **8**, 1, 10-18, 1968.

26. A. Phillips, C.S. Liu, J.W. Justusson, An Experimental Investigation of Yield Surfaces at Elevated Temperatures, Acta Mechanica, **14**, 119-146, 1972.

27. 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.

28. 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.

29. Z.L. Kowalewski, M. Śliwowski, G. Socha, Wpływ różnokierunkowej deformacji cyklicznej na ewolucję powierzchni plastyczności stali 18G2A, Prace IPPT (złożona do druku), 1994.

30. 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.

31. W. Szczepiński, L. Dietrich, J. Miastkowski, Plastic properties of metals, part one in: Experimental Methods in Mechanics of Solids, PWN - Elsevier, 1990.

32. 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.

http://rcin.org.pl

33. S.S. Hecker, Experimental Studies of Yield Phenomena in Biaxially Loaded Metals, in: Costitutive 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.

34. R.V. Mises, Mechanik der plastischen Formanderung von Kristallen, Zeitsch. Angew. Math. Mech., **8**, 3, 161-185, 1928.

35. W. Szczepiński, On Deformation-induced Plastic Anisotropy of Sheet Metals, Arch. Mech., **45**, 1, 3-38, 1993.

36. L. Dietrich, R. Kiryk, G. Socha, M. Śliwowski, Identyfikacja plastycznej anizotropii stopu aluminium, Prace IPPT (w druku), 1994.

http://rcin.org.pl