

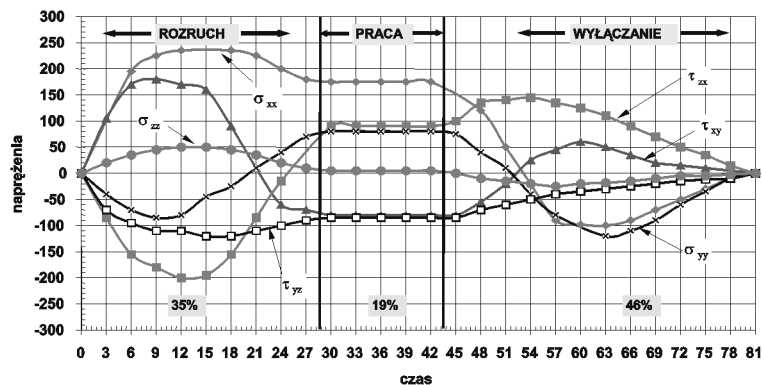
Laboratoryjne symulacje obciążeń cyklicznych determinujących zmiany właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych

TADEUSZ SZYMCZAK
ZBIGNIEW L. KOWALEWSKI

Elementy urządzeń stosowane w przemyśle maszynowym, energetycznym oraz lotniczym pracują zazwyczaj w trudnych warunkach eksploatacyjnych wynikających przeważnie ze złożonych obciążeń, prowadzących do zmiany właściwości mechanicznych wykorzystywanych materiałów konstrukcyjnych. Jedną z form złożonych obciążeń stanowią obciążenia proporcjonalne, tzn. takie, których składowe zachowują w danym cyklu obciążeniowym niezmienny stosunek. Inną formą są obciążenia nieproporcjonalne, które cechują się złożoną nieliniową postacią funkcji zmiany składowych obciążeń. Niewątpliwie obciążenia złożone, wykazujące przesunięcia w fazie pomiędzy składowymi swoich sygnałów, to w dużej mierze czynniki istotnie wpływające na właściwości mechaniczne materiałów konstrukcyjnych.

Rys. 1. Zmiana składowych tensora naprężenia podczas eksploatacji wirnika turbiny gazowej [1]

Nieproporcjonalny charakter obciążeń eksploatacyjnych ilustruje rys. 1. Przedstawiono na nim zmianę składowych tensora naprężenia σ_{ij} podczas trzech okresów eksploatacji wirnika turbiny gazowej. Wyraźna nieproporcjonalność widoczna jest w pierwszym i trzecim okresie pracy wirnika turbiny, tzn. podczas rozruchu i wyłączenia urządzenia. Poza różnicami w wartościach oraz przebiegach funkcji składowych tensora naprężenia zauważalne są zmia-



Mgr inż. Tadeusz Szymczak jest pracownikiem Katedry Mechaniki i Informatyki Stosowanej Politechniki Białostockiej, a doc. Zbigniew L. Kowalewski jest pracownikiem Zakładu Wytrzymałości Materiałów IPPT PAN oraz Instytutu Transportu Samochodowego.

ny ich znaku, co może mieć istotne znaczenie przy wykorzystaniu materiałów wykazujących efekt Bauschingera. W wypadku przyjęcia jednakowych wartości granic plastyczności przy rozciąganiu i ściskaniu dominującym okresem wykazującym

zdecydowany wpływ na kształtowanie właściwości mechanicznych wykorzystanych materiałów jest czas rozruchu.

W prowadzonych ocenach zmian właściwości mechanicznych wywołanych wskutek wstępnej historii obciążenia można wyróżnić trzy aspekty badawcze:

- Badania właściwości mechanicznych materiałów po wstępnej deformacji plastycznej będącej następstwem procesów wytwórczych,
- Badania wpływu wstępnej deformacji plastycznej na zachowanie się materiałów przy obciążeniach długotrwałych,
- Badania stopnia zużycia elementu konstrukcyjnego.

W pierwszym aspekcie badania skupiają się na ocenie zmian kształtu, wymiarów oraz położenia powierzchni plastyczności dla materiału będącego gotowym produktem (na przykład pręt po wyciskaniu lub walcowaniu, odkuwka po operacji kucia czy też blachy po walcowaniu).

W drugim – można wyróżnić dwie metody badawcze: bezpośrednią, polegającą na poddaniu uformowanego elementu konstrukcyjnego długotrwałym obciążeniom, po czym uzyskany wynik porównuje się z rezultatem uzyskanym dla materiału wzorcowego, lub pośrednią, która wymaga zadania w materiale wstępnej deformacji o wartości odzwierciedlającej wielkości spotykane w procesie wytwórczym wyrobu, a następnie poddania go przyjętemu programowi obciążeń eksploatacyjnych. W drugim z omawianych przypadków, tj. metodzie pośredniej, otrzymany wynik uzyskany dla materiału w stanie dostawy porównuje się z wynikami uzyskanymi dla materiału z zadaną celowo wstępną deformacją plastyczną.

W trzecim aspekcie oceny właściwości mechanicznych po deformacji znane są co najmniej dwie metody. Pierwsza z nich jest metodą inwazyjną, polegającą na pobraniu materiału do badań z eksploatacyjnych konstrukcji. Jest jednak rzadziej stosowana ze względu na uszkodzenia konstrukcji związane z pobieraniem próbek. Druga metoda, powszechnie (np. [3 – 6]) stosowana przez wiele laboratoriów, polega na symulacji długotrwałych obciążeń eksploatacyjnych przez wykonanie prób pełzania, wibropętzenia lub zmęczenia, a następnie ocenie zmian właściwości mechanicznych materiału za pomocą na przykład określenia powierzchni plastyczności dla materiału będącego w różnym stopniu zaawansowania procesu uszkodzenia, odpowiadającego z góry zaplanowanemu czasowi trwania próby.

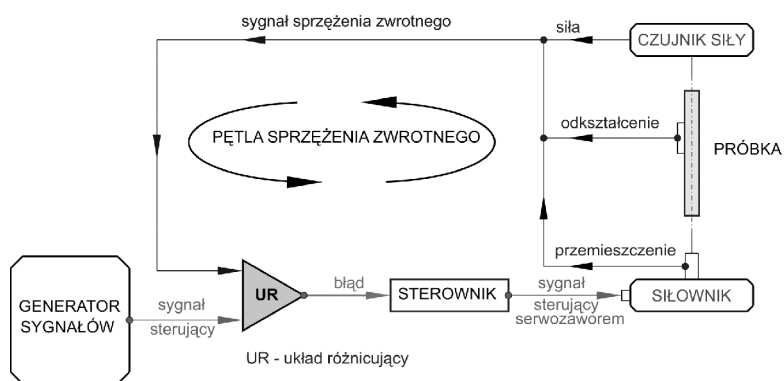
Techniczne uwarunkowania prowadzenia eksperymentu z wykorzystaniem obciążeń nieproporcjonalnych

Stała potrzeba precyzyjnej identyfikacji właściwości mechanicznych materiałów poddanych działaniu złożonych obciążeń eksploatacyjnych wymusza prowadzenie nowych doświadczeń na sprzęcie gwarantującym wysoką dokładność i powtarzalność wyników. Możliwość taką dają hydrauliczne maszyny wytrzymałościowe pracujące w pętli sprzężenia zwrotnego (rys. 2).

Zaprojektowany przez operatora przebieg czasowy parametru kontrolowanego przez układ sterujący maszyny jest wprowadzony do pamięci komputera sterującego. Po uruchomieniu testu wartość parametru kontrolowanego mierzona przez przetwornik pomiarowy jest porównywana w czasie rzeczywistym z zaprojektowanym przez operatora przebiegiem. Sygnał błędny, będący różnicą wspomnianych wielkości, jest zamieniany w układzie sterującym serwozaworu na sygnał sterujący serwozaworem, który otwiera lub zamyka dopływ oleju do siłownika hydraulicznego korygując wspomniany błąd. Podana zasada działania maszyny wytrzymałościowej pozwala na sterowanie przebiegiem testu, w trakcie którego parametrem kontrolowanym przez układ sterujący może być przemieszczenie tłoka siłownika (lub uchwytu maszyny), siła obciążająca próbkę lub odkształcenie części pomiarowej próbki mierzone przez odpowiedni przetwornik pomiarowy. Jest to bardzo ważne przy badaniu materiałów, których własności mechaniczne zależą od prędkości obciążania lub odkształcania, gdyż pozwala na prowadzenie testów z precyzyjnie określoną prędkością odkształcania lub obciążenia.

Istotnym warunkiem poprawności eksperymentu jest zapewnienie jednorodności stanu naprężenia i odkształcenia w części pomiarowej próbki, który może być zakłócony przez: niewłaściwe jej zamocowanie w uchwytach maszyny wytrzymałościowej (niewspółosiowość, przekoszenie, przesunięcie), zmianę geometrii próbki na skutek zadanych obciążeń, zmianę sztywności części chwytowej wynikającą z jej deformacji w uchwytach maszyny. Wpływ błędów ustawień maszyny jest oczywisty i powinien być zmniejszony do minimum przy wszelkich badaniach wytrzymałościowych. Zaciśnięcie próbki w uchwytach hydraulicznych maszyny może wywoływać imperfekcję geometryczną, przejawiającą się nieznacznym zniekształceniem na przejściu pomiędzy pomiarową i chwytową częścią próbki. Ocena wpływu możliwych czynników zakłócających eksperyment stanowi niezbędne uzupełnienie badań przede wszystkim w warunkach złożonego stanu naprężenia [7].

Należy jednocześnie nadmienić, że możliwości prowadzenia badań na hydraulicznych maszynach wytrzymałościowych pracujących w pętli sprzę-



Rys. 2. Schemat pracy hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej w pętli sprzężenia zwrotnego

żenia zwrotnego pojawiły się w ostatnim półwieczu ubiegłego stulecia, gdy układy mechaniczne maszyn wyposażono dodatkowo w systemy elektroniczne. Wykorzystanie w badaniach takich maszyn czyni eksperyment w pełni kontrolowany pod względem jakości, poprawności, wiarygodności i akceptowalności uzyskiwanych wyników.

Numeryczne modelowanie wybranych przypadków obciążeń nieproporcjonalnych przy działaniu siły osiowej i momentu skręcającego

Nieproporcjonalność obciążeń polega na istnieniu nieliniowej relacji na płaszczyźnie naprężeń (płaszczyźnie odkształceń) pomiędzy stosowanymi przebiegami sygnałów wymuszeń w postaci składowych naprężenia lub odkształcenia. Badania tego typu zapewniają współczesne hydrauliczne maszyny wytrzymałościowe, pracujące w pętli sprzężenia zwrotnego.

W numerycznej analizie przebiegów nieproporcjonalnych stosuje się powszechnie koncepcję wymuszenia kinematycznego (sterowanie prędkością odkształcenia). W modelowaniu proporcjonalnych i nieproporcjonalnych ścieżek obciążenia (tab.) korzystano z założenia wprowadzenia w materiale jednakowej wartości deformacji realizowanych wzdłuż trzech różnych cyklicznych ścieżek obciążenia (droga proporcjonalna, kołowa, kwadratowa). Za miarę wprowadzanych deformacji przyjęto wyrażenie na odkształcenia efektywne ϵ_e , które wyznaczono według podanej procedury.

Korzystając z równania na odkształcenie oktaedryczne γ_o , tj.:

$$\frac{9}{4} \gamma_o^2 = (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \quad (1)$$

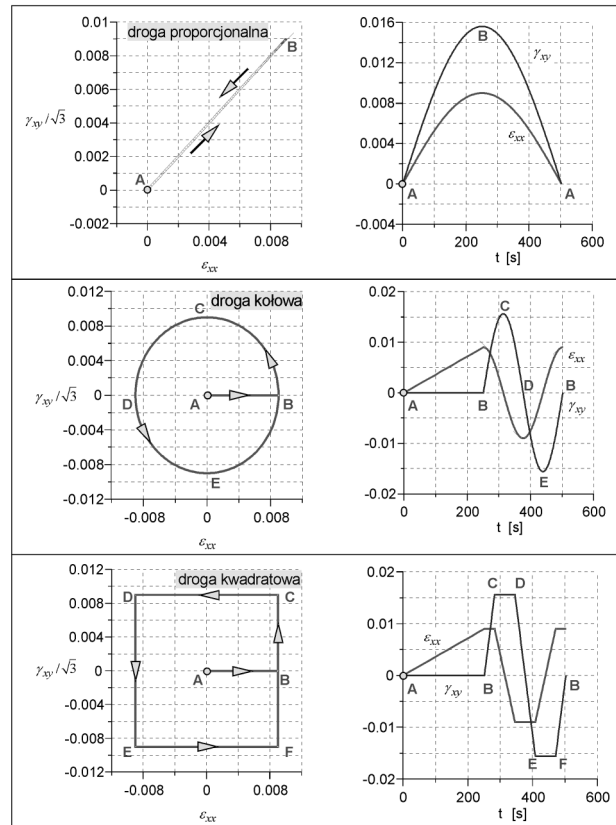
oraz analizy istniejącego płaskiego stanu naprężenia przeanalizowano stan odkształcenia, otrzymując następujące składowe jego tensora:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \sigma_{xy} \quad (2)$$

$$\epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = -\nu \epsilon_{xx} = -\nu \frac{\sigma_{xx}}{E}$$

Sposoby projektowania cyklicznych obciążeń proporcjonalnych i nieproporcjonalnych



Po uwzględnieniu składowych tensora odkształcenia (2) w wyrażeniu na odkształcenie oktaedryczne (1) otrzymano zależność na odkształcenie efektywne w następującej postaci:

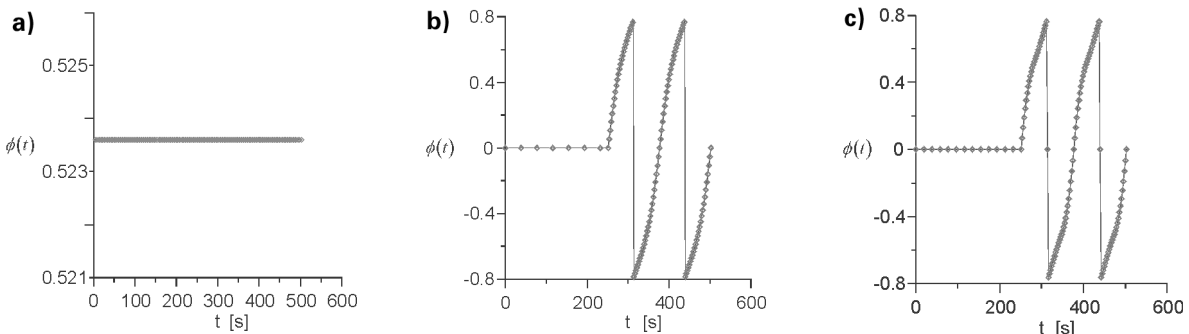
$$\epsilon_e = \sqrt{\epsilon_{xx}^2 + \frac{3}{(1 + \nu)^2} \epsilon_{xy}^2} \quad (3)$$

gdzie:

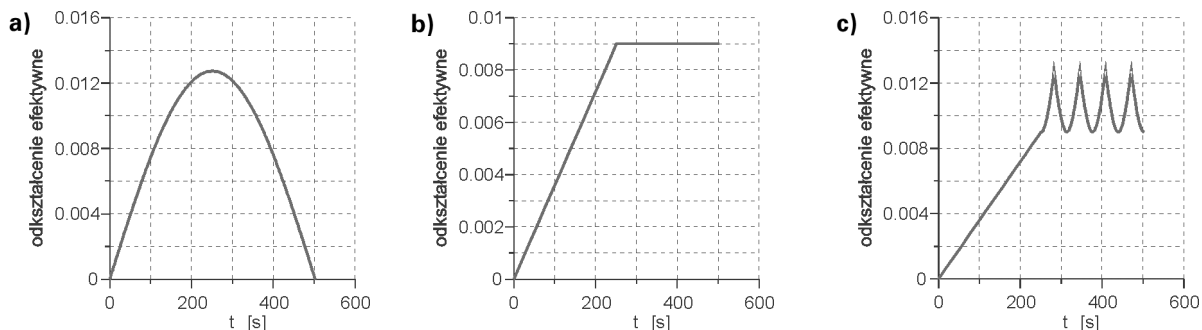
- ϵ_{xx} – odkształcenie osiowe,
- $\epsilon_{xy} = \gamma_{xy}/2$ – odkształcenie postaciowe,
- γ_{xy} – kąt odkształcenia postaciowego,
- ν – współczynnik Poissona.

Jeśli założymy wartość współczynnika Poissona $\nu = 0,5$, co odpowiada materiałom izotropowym, zależność (3) sprowadzi się do następującego wzoru:

$$\epsilon_e = \sqrt{\epsilon_{xx}^2 + \frac{1}{3} \gamma_{xy}^2} \quad (4)$$



Rys. 3. Zmiany kierunków sygnałów wymuszenia w cyklu obciążenia przy cyklicznych obciążeniach proporcjonalnych i nieproporcjonalnych: a) droga proporcjonalna, b) droga kołowa, c) droga kwadratowa



Rys. 4. Zmiana odkształcenia efektywnego w cyklu obciążenia w przypadku cyklicznych obciążeń proporcjonalnych i nieproporcjonalnych: a) droga proporcjonalna, b) droga kołowa, c) droga kwadratowa

Kąt określający położenie kierunków głównych wymuszenia wyznaczono na podstawie relacji wynikającej z analizy stanu odkształcenia za pomocą koła Mohra, z której wynika:

$$\phi = \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_{xy}(t)}{\varepsilon_{xx}(t)} \right) \quad (5)$$

gdzie: t – parametr czasu.

Jak wspomniano, numeryczną symulację rozpatrywanych ścieżek obciążenia prowadzono dla jednakowej wartości odkształcenia efektywnego, tj. $\varepsilon_e = 0,009$ wyznaczonego zgodnie z wyrażeniem (4).

W dalszej części pracy nieco szerzej rozpatrzono przypadek obciążeń nieproporcjonalnych po drodze kołowej i kwadratowej o przebiegach przedstawionych w tab.

Cechą charakterystyczną obciążeń nieproporcjonalnych jest rotacja kierunków głównych naprężenia i odkształcenia (rys. 3). Poza tym, istotną właściwością różniącą obciążenia proporcjonalne od nieproporcjonalnych jest charakter zmian wykorzystanej miary efektywnych odkształceń ε_e (rys. 4).

Wykresy zamieszczone na rys. 4 pokazują, że zmienność wartości efektywnego odkształcenia w cyklu obciążenia osiągnięta jest jedynie dla obciążenia nieproporcjonalnego po drodze kołowej. W wypadku rozpatrywanych obciążeń proporcjonalnych i nieproporcjonalnych wzdłuż ścieżki obciążenia w kształcie kwadratu widoczny jest efekt zmiany tego parametru w cyklu obciążenia. Taki przebieg zmian efektywnego odkształcenia w cyklu wskazuje, że maksymalne obciążenie materiału występuje dla cykli nieproporcjonalnych wzdłuż ścieżki kołowej. Jest to jedna z przyczyn większego stopnia umocnienia materiału przy cyklach kołowych niż obserwowana dla innych obciążeń przy jednakowej amplitudzie odkształcenia.

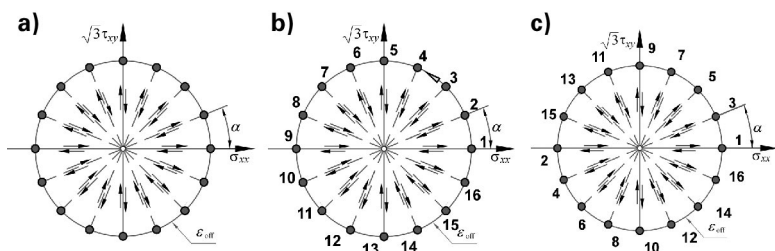
Wybrane techniki identyfikacji wpływu złożonych obciążeń eksploatacyjnych na właściwości mechaniczne materiałów konstrukcyjnych

Jednym z kierunków doświadczalnych badań plastyczności, umożliwiającym określenie wielu parametrów mechanicznych, jest koncepcja polegająca na wyznaczaniu powierzchni plastyczności. Podejście to można z powodzeniem stosować w celu zbadania zmian parametrów mechanicznych po realizacji eksperymentów, których celem jest wywołanie wstępnej deformacji testowanych materiałów wskutek obciążeń o charakterze statycznym, monotonicznym czy cyklicznym. Zadaniem takich badań jest określenie zmian podstawowych parametrów mechanicznych pod wpływem symulowanych obciążeń eksploatacyjnych. Otrzymane wyniki stanowią bazę do rozwiązywania podstawowego problemu teoretycznego, polegającego nie tylko na opisie funkcji plastyczności, ale również na opisie ruchu powierzchni plastyczności przez stosownie zdefiniowane parametry umocnienia oraz zmiany wprowadzonych parametrów [8].

Powierzchnia plastyczności oddzielająca zakres sprężystego i plastycznego zachowania się materiału przy złożonych stanach naprężenia stanowi podstawowy element wytrzymałościowej charakterystyki materiałów konstrukcyjnych. Jej kształt i położenie w przestrzeni naprężeń są zależne od rodzaju historii deformacji zastosowanej w okresie użytkowania danego elementu [2].

Wyznaczanie powierzchni plastyczności przeprowadza się wykorzystując jedną z następujących technik [3, 9]:

- metoda wielu próbek, w której każdą próbkę obciąża się w dwuwymiarowej przestrzeni naprężeń (σ , τ) wzdłuż innej drogi proporcjonalnego przyrostu naprężenia aż do osiągnięcia określonej wartości offsetu plastycznego (odkształcenia trwałego) (rys. 5a),



Rys. 5. Techniki wyznaczania powierzchni plastyczności: a) metoda wielu próbek, b) metoda pojedynczej próbki – wariant sekwencyjnego obciążania w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, c) metoda pojedynczej próbki – wariant naprzemiennego obciążania przy różnicy kierunków obciążania wynoszącym 180 stopni

- metoda pojedynczej próbki, gdzie jedną próbkę obciążamy w dwuwymiarowej przestrzeni naprężeń (σ , τ) wzdłuż różnych dróg przyrostu naprężenia aż do osiągnięcia określonej wartości offsetu plastycznego, przy czym następuje odciążenie i ponowne obciążenie dla innej kombinacji obciążenia aż do uzyskania uplastycznienia o wartości jak dla pierwszej rozpatrywanej ścieżki obciążenia. Proces ten kontynuowany jest do momentu zrealizowania wszystkich zaplanowanych kombinacji obciążenia. W podanej procedurze spotyka się wiele różnych wariantów kolejności obciążania, dwie częściej stosowane ilustruje rys. 5b, c.

Metoda wielu próbek znacznie podnosi koszty wykonania badań, ale każdy punkt powierzchni plastyczności nie jest obciążony wpływem na wynik pomiaru związanym z deformacją uzyskaną w wcześniejszym kierunku obciążania, jak to jest w wypadku metody pojedynczej próbki. Istotną wadą metody wielu próbek mogą być błędy wynikające z możliwości wystąpienia różnic właściwości mechanicznych pomiędzy badanymi próbkami. Metoda pojedynczej próbki w różnych jej wariantach może być wykorzystywana do analizy zmiany powierzchni plastyczności przy spełnieniu warunków związanych z ograniczeniem wartości plastycznej deformacji, jakich doznaje próbka na kolejnych kierunkach obciążania oraz z przyjętą miarą uplastycznienia.

Omawiane metody dają zadowalające i porównywalne wyniki, gdy przyjęta miara uplastycznienia jest wystarczająco mała, z reguły poniżej 0,01% [10].

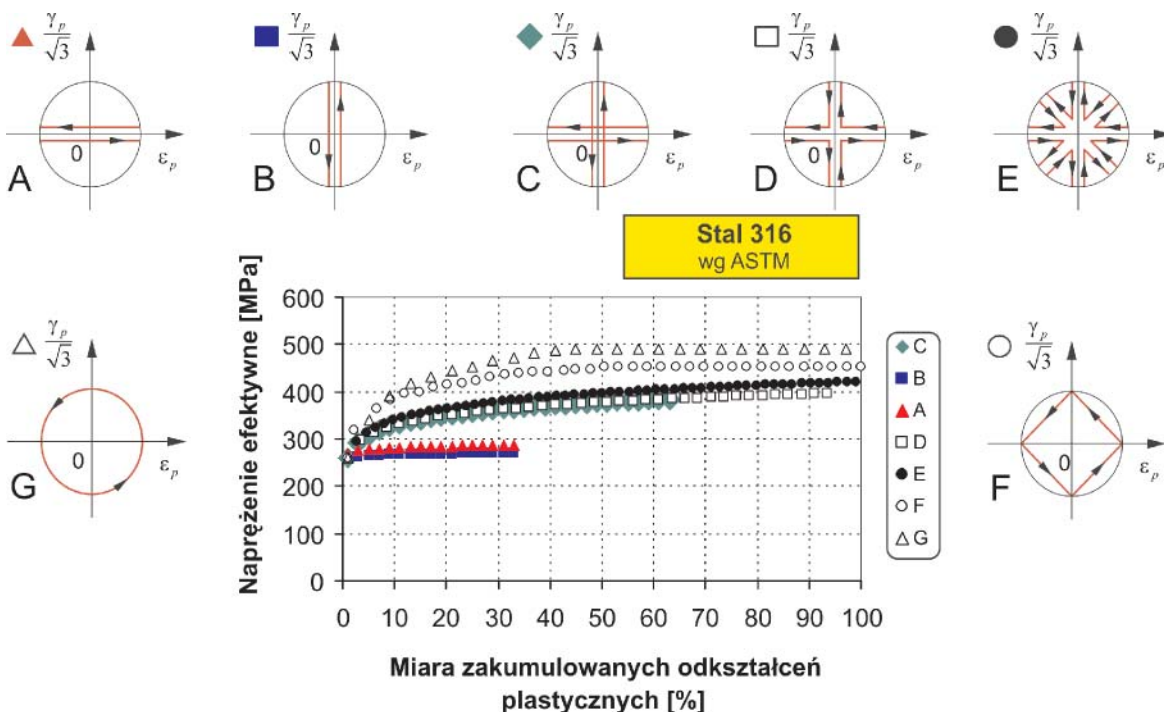
Podczas prowadzenia badań mających na celu wyznaczenie powierzchni plastyczności, obciążania (w omawianym przypadku rozciąganie ze skręcaniem) próbki powinny być realizowane za pomocą programu komputerowego sterującego siłownikami hydraulicznymi maszyny wytrzymałościowej. Omawiane sterowanie zapewnia żadaną prędkość poszczególnych składowych odkształceń z zachowa-

niem stałego stosunku tych dwóch składowych odkształceń aż do osiągnięcia żądanej wartości efektywnych odkształceń plastycznych (offset plastyczny). W początkowym etapie obciążania próbki obliczany jest moduł sprężystości wzdłużnej na podstawie punktów doświadczalnych zebranych w ustalonym z góry przedziale wartości naprężeń. Obciążenie zostaje wstrzymane, jeśli różnica efektywnych odkształceń całkowitych i efektywnych odkształceń sprężystych, obliczonych jako iloraz naprężeń efektywnych i wyznaczonego wcześniej modułu *Younga*, przekroczy ustaloną wartość. Po spełnieniu tego warunku następuje zmiana parametru sterowania z odkształceń na siłę osiową i moment skręcający i badana próbka zostaje odciążona do zerowych wartości siły osiowej i momentu skręcającego. Jest to jednoznaczne z zakończeniem próby dla jednej proporcji pomiędzy składowymi odkształceniemi [3].

Wpływ złożonych obciążeń eksploatacyjnych na parametry mechaniczne materiałów konstrukcyjnych

Wprowadzanie w materiałach konstrukcyjnych deformacji plastycznej przyczynia się do ukształtowania tekstury determinującej późniejsze zachowanie elementu w warunkach złożonych obciążeń eksploatacyjnych. Omawiany aspekt jest szczególnie istotny, gdy wymagana jest ocena dalszej bezpiecznej pracy wybranego elementu względnie całej konstrukcji. Wynika stąd konieczność identyfikacji wpływu historii złożonych obciążeń na właściwości mechaniczne materiału.

Jednym z efektów towarzyszących działaniu złożonych obciążeń eksploatacyjnych jest umocnienie bądź osłabienie materiału. Przebieg krzywych cyklicznego wzmocnienia uzależniony jest w znacznym stopniu od typów obciążeń, które można podzielić na takie grupy, jak: a) proste obciążenia proporcjonalne (rozciąganie, skręcanie); b) krzyżowe obciążenia



Rys. 6. Wpływ kształtu drogi obciążenia na cykliczne wzmocnienie materiału [11]

żenia proporcjonalne (typ gwiazdowy) oraz c) obciążenia nieproporcjonalne (kwadrat, koło). Decydujący wpływ na cykliczne wzmocnienie materiału mają obciążenia nieproporcjonalne. Spośród dróg nieproporcjonalnych największy efekt cyklicznego wzmocnienia wprowadza obciążenie po drodze kołowej (rys. 6), [11]. Badania zespołu Callocha i Marquisa [12] wskazują jednak, że jeszcze większe umocnienie można uzyskać prowadząc deformację materiału przy nieproporcjonalnych obciążeniach cyklicznych po drodze określanej mianem „motylek”.

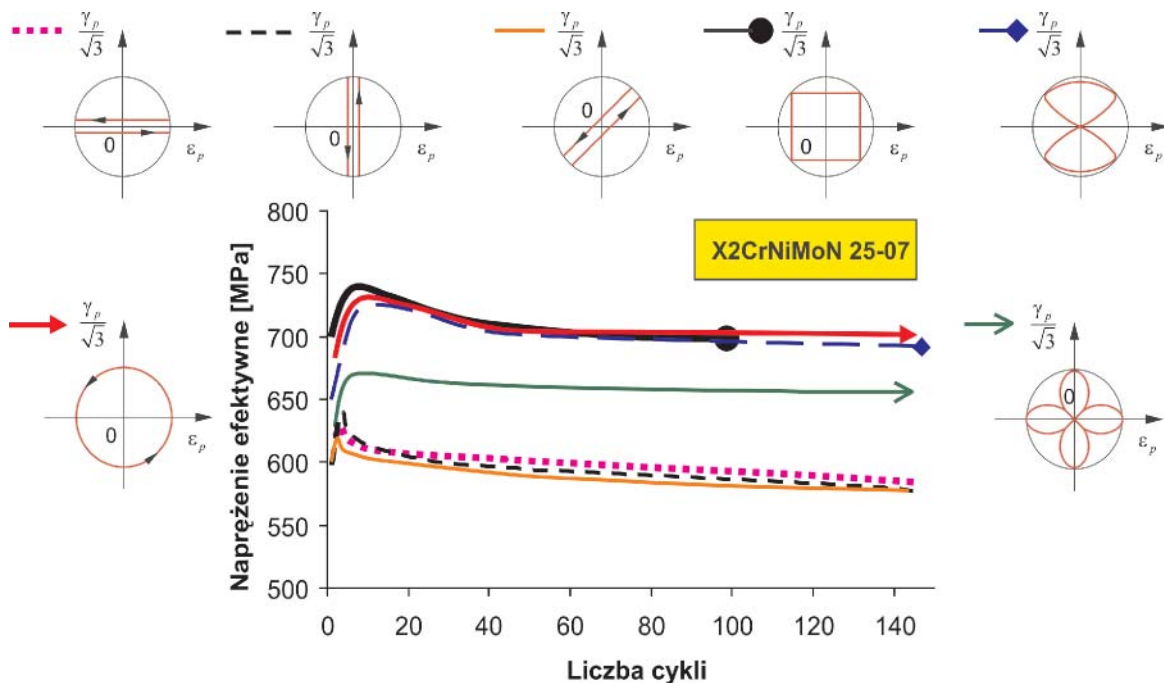
Zachowania takiego nie potwierdzają badania zespołu Aubina [13], (rys. 7). W badaniach Aubina można wyraźnie zaobserwować trzy obszary wpływu w zależności od liczby cykli. Podczas pierwszych cykli widoczny jest efekt cyklicznego wzmocnienia, następnie krótki okres stabilizacji maksymalnej wartości umocnienia, po czym obserwuje się cykliczne osłabienie o asymptotycznym charakterze do wartości naprężenia efektywnego, osiąganego dla pierwszych cykli obciążenia.

Niewątpliwie nie tylko kształt drogi obciążenia wywiera wpływ na cykliczne wzmocnienie, lecz również sekwencja stosowanych dróg obciążeń (rys. 8). Badania prezentowane na rys. 8 wyraźnie ten problem identyfikują. Dla każdego rodzaju deformacji cyklicznej prowadzono badania aż do momentu osiągnięcia cyklu ustalonego. Po jego uzyskaniu następowała zmiana kształtu drogi obciążania.

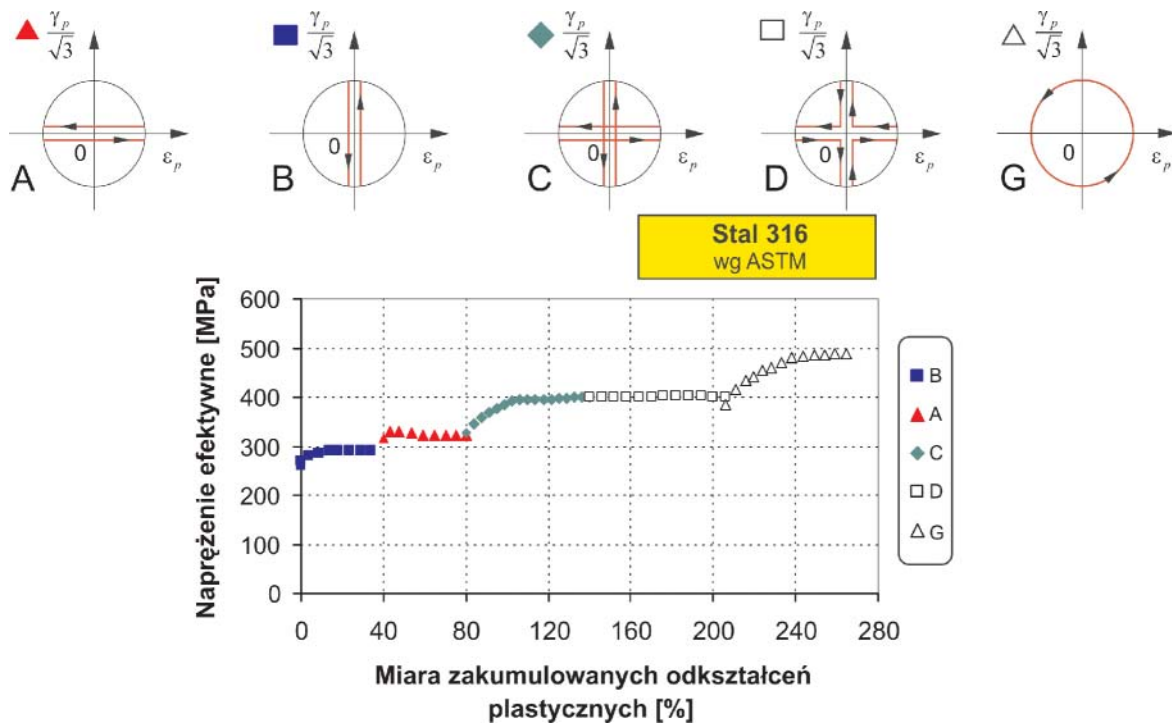
Wyniki prezentowane na rys. 8 wskazują, że obciążenia proporcjonalne wywierają niewielki wpływ na cykliczne wzmocnienie rozpatrywanego materiału. Natomiast największe umocnienie zaobserwowano dla obciążenia cyklicznego po drodze kołowej [11]. Warto zwrócić uwagę, że obciążenia cykliczne po drodze kołowej dawały największy efekt tzw. wzmocnienia dodatkowego, które występowało po umocnieniu do stanu nasycenia dla obciążenia realizowanego wcześniej wzdłuż innej drogi obciążenia cyklicznego.

Obciążenia eksploatacyjne mają nie tylko charakter zmienny, ale również występują często w postaci długoterminowych obciążeń stałych, którym towarzyszy podwyższona temperatura. W literaturze można spotkać wiele prac dotyczących tego zagadnienia, np.: [14 – 18]. Na uwagę zasługuje praca [18], w której zaprezentowano ewolucję powierzchni plastyczności miedzi M1E na skutek wprowadzonych deformacji przez pełzanie i plastyczne płynięcie w obu przypadkach realizowanych przez jednoosiowe rozciąganie (rys. 9).

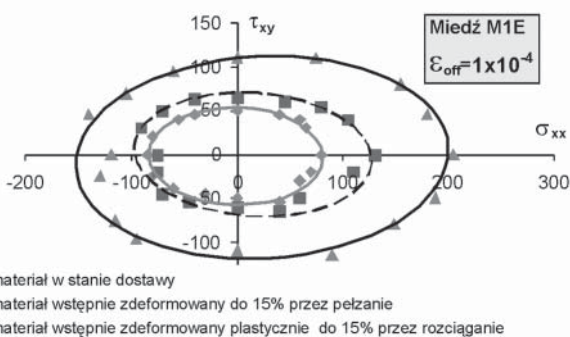
Widoczna symetria punktów powierzchni plastyczności dla materiału dziewiczego względem przyjętego układu współrzędnych wskazuje na izotropię początkowych właściwości mechanicznych badanego materiału. Analiza kształtu i wymiarów powierzchni plastyczności identyfikuje efekt większego wzmocnienia materiału na skutek wstępnej deformacji plastycznej przez monotoniczne rozciąganie w temperaturze otoczenia niż w wypadku jednakowej co do wartości deformacji trwałej, zadanej w procesie pełzania w podwyższonej temperaturze. Interpretację uzyskanego wyniku można oprzeć na fizycznych zjawiskach zachodzących w miedzi przy wprowadzaniu różnych rodzajów deformacji. Wstępna deformacja plastyczna materiału wywołana drogą monotonicznego rozciągania próbek w temperaturze pokojowej powoduje wzmocnienie materiału, które związane jest ze zmniejszeniem gęstości ruchomych dyslokacji hamowanych na różnego rodzaju przeszkodach. Im większa wartość wprowadzonej deformacji, tym mniejsza gęstość ruchomych dyslokacji, a tym samym większe wzmocnienie [18]. Przy wprowadzaniu odkształcenia wskutek pełzania oprócz wzmocnienia deformacyjnego występuje efekt osłabienia termicznego wskutek zdrowienia. Jest to efekt decydujący w tym wypadku o dużo mniejszym stopniu umocnienia obserwowanego dla próbek poddanych wstępnie deformacji wskutek pełzania.



Rys. 7. Wpływ kształtu drogi obciążenia na cykliczne wzmocnienie materiału [13]



Rys. 8. Wpływ sekwencji drogi obciążenia na cykliczne wzmocnienie materiału [11]



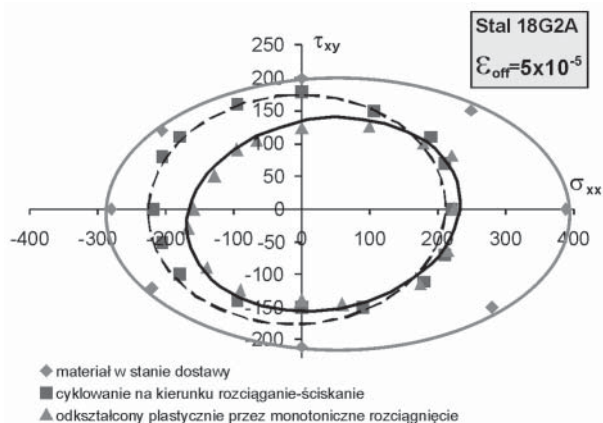
Rys. 9. Porównanie początkowej powierzchni plastyczności z powierzchniami dla materiału zdeformowanego wstępnie do wartości odkształcenia 15% procesem pełzania i monotonicznego rozciągania przy definicji granicy plastyczności odpowiadającej offsetowi plastycznemu 10^{-4} [18]

Wstępna deformacja plastyczna nie zawsze prowadzi do umocnienia materiału. Uzależnione to jest od rodzaju materiału, a dla danego materiału od wielkości deformacji i jej typu. Przykładem zupełnie odmiennego charakteru odpowiedzi na wstępną deformację plastyczną w stosunku do poprzednio pokazanych jest odpowiedź na predeformację wywołaną w stali 18G2A (rys. 10).

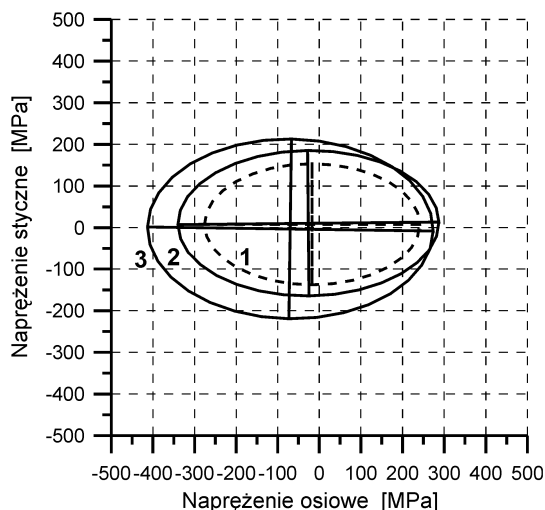
W tym przypadku pierwotna powierzchnia plastyczności stali 18G2A w stanie dostawy wskazuje na anizotropię właściwości mechanicznych materiału. Przeprowadzony program obciążeń cyklicznych (cykl wahadłowy) wywołał osłabienie materiału wyrażające się zmniejszeniem powierzchni plastyczności. Ponadto, przeciążenie poza wyraźną granicę plastyczności w programie obciążeń cyklicznych przyczyniło się do zniwelowania różnic między wartościami granic plastyczności na rozciąganie i ściskanie. Interesujący jest także fakt, że deformacja zadawana na drodze jednoosiowego monotonicznego rozciągania o wartości jednakowej jak przy progra-

mie cyklicznym wywołała osłabienie o przeszło 11% większe w stosunku do materiału po obciążeniu cyklicznym [8].

Jak już pokazano [8, 18], analizę zmian właściwości materiałów pod wpływem różnych form plastycznej deformacji przeprowadza się często na podstawie zmian powierzchni plastyczności. Podejście to zastosowano w już omówionych przykładach, w których materiały deformowano wstępnie wskutek obciążeń monotonicznie narastających, stałych i cyklicznych. Jest to szczególnie przydatny sposób analizy zmian właściwości mechanicznych w pewnych aspektach zagadnień dotyczących obciążeń cyklicznych. Zostanie to zilustrowane na przykładzie badań zrealizowanych na stopie aluminium PA6. Oceny właściwości mechanicznych tego materiału dokonywano w stanie dostawy i po wstępnej deformacji plastycznej wywołanej:



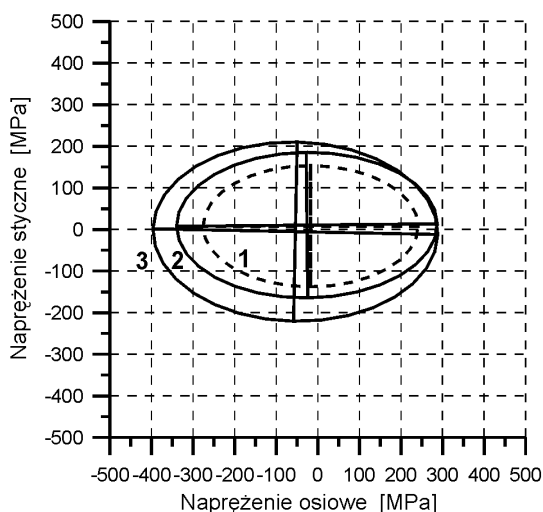
Rys. 10. Porównanie początkowej powierzchni plastyczności z powierzchniami dla materiału zdeformowanego wstępnie do wartości odkształcenia 15% procesem pełzania i monotonicznego rozciągania przy definicji granicy plastyczności odpowiadającej offsetowi plastycznemu 10^{-4} [8]



Rys. 11. Porównanie początkowej powierzchni plastyczności z powierzchniami po cyklach proporcjonalnych rozciąganie-ściskanie: 1 – początkowa powierzchnia plastyczności, 2 – powierzchnia plastyczności po cyklach o amplitudzie odkształcenia osiowego $\pm 0,0065$, 3 – powierzchnia plastyczności po cyklach o amplitudzie odkształcenia osiowego $\pm 0,009$

- proporcjonalnymi obciążeniami cyklicznymi (20 cykli przy częstotliwości 0,025 Hz),
- nieproporcjonalnymi obciążeniami cyklicznymi wzdłuż ścieżki o kształcie okręgu (20 cykli przy częstotliwości 0,025 Hz).

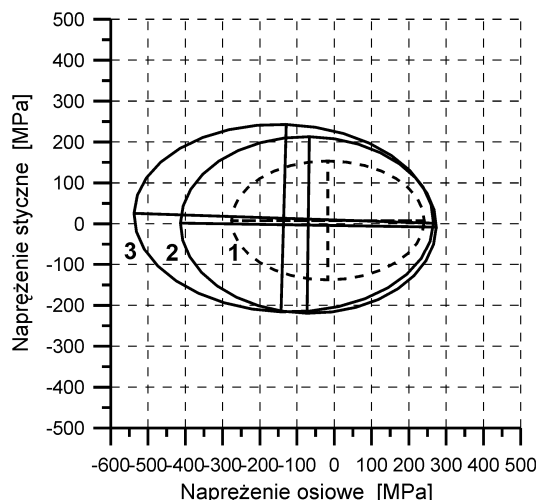
W obu wypadkach przeprowadzono badania przy jednakowych amplitudach odkształcenia. Przyjęto dwie wielkości tego parametru: $\pm 0,0065$ i $\pm 0,0090$. Wstępną deformację materiału wskutek proporcjonalnych obciążeń cyklicznych prowadzono wzdłuż ścieżki rozciąganie-ściskanie, przy czym program tych obciążeń był całkowicie symetryczny względem osi czasu, tzn. wartość bezwzględna maksymalnego obciążenia przy rozciąganiu była równa wartości bezwzględnej obciążenia przy ściskaniu. Jak już wspomniano, przy obciążeniach cyklicznych nieproporcjonalnych rozpatrywano przypadek ścieżki



Rys. 12. Porównanie początkowej powierzchni plastyczności z powierzchniami po cyklach proporcjonalnych i nieproporcjonalnych: 1 – początkowa powierzchnia plastyczności, 2 – powierzchnia plastyczności po cyklach proporcjonalnych rozciąganie-ściskanie o amplitudzie odkształcenia osiowego $\pm 0,0065$, 3 – powierzchnia plastyczności po cyklach kołowych o amplitudach odkształceń $\pm 0,0065$

obciążania, która w dwuwymiarowej przestrzeni odkształceń przyjmowała kształt okręgu. Na rys. 11 przedstawiono zmianę pierwotnej powierzchni plastyczności w zależności od amplitudy proporcjonalnych obciążeń cyklicznych. Z rysunku wynika, że wzrostowi amplitudy odkształcenia towarzyszy przyrost umocnienia. Ponadto z rys. 11 wynika, że wstępna deformacja w postaci cykli proporcjonalnych wywołuje efekt umocnienia o charakterze izotropowym. Dla większej amplitudy odkształcenia oprócz efektu umocnienia izotropowego pojawia się wzmocnienie kinematyczne, wyrażające się przesunięciem wtórnej powierzchni plastyczności w kierunku ściskania.

Na kolejnych dwóch rysunkach (rys. 12 i 13) zilustrowano, jaka może zaistnieć różnica we właściwościach



Rys. 13. Porównanie początkowej powierzchni plastyczności z powierzchniami po cyklach proporcjonalnych i nieproporcjonalnych: 1 – początkowa powierzchnia plastyczności, 2 – powierzchnia plastyczności po cyklach proporcjonalnych rozciąganie-ściskanie o amplitudzie odkształcenia osiowego $\pm 0,009$, 3 – powierzchnia plastyczności po cyklach kołowych o amplitudach odkształceń $\pm 0,009$

ciwościach mechanicznych stopu aluminium, jeżeli w procesie wstępnej deformacji zastosujemy różne sposoby obciążenia w ramach jednakowej wartości amplitudy odkształcenia cyklicznego. Rys. 12 pokazuje porównanie początkowej powierzchni plastyczności z powierzchniami dla materiału odkształconego cyklicznie metodą obciążeń proporcjonalnych realizowanych przez naprzemienne rozciąganie i ściskanie oraz drogą nieproporcjonalnych obciążeń po ścieżce kołowej przy amplitudach odkształceń $\pm 0,0065$. Takie samo porównanie zamieszczone jest na rys. 13 dla amplitud odkształceń cyklicznych wynoszących $\pm 0,009$. Jak widać z obu rysunków, krytyczną formą wstępnej deformacji są nieproporcjonalne obciążenia cykliczne, które dla obu rozpatrywanych amplitud odkształcenia wywołują znacznie większy stopień umocnienia w zestawieniu z efektem spowodowanym proporcjonalnymi obciążeniami cyklicznymi. Porównania zamieszczone na rys. 12 i 13 mogą stanowić kolejną, w stosunku do już prezentowanych, formę ilustracji efektu dodatkowego wzmocnienia stopu aluminium obserwowanego dla nieproporcjonalnych obciążeń cyklicznych wzdłuż ścieżki kołowej w stosunku do obciążeń jednoosiowych o tej samej amplitudzie.

W klasyczny sposób efekt dodatkowego wzmocnienia zaprezentowany jest na rys. 14, gdzie porównano amplitudy naprężenia w funkcji numeru cyklu dla obciążeń proporcjonalnych rozciąganie-ściskanie i obciążeń nieproporcjonalnych po ścieżce kołowej. We wszystkich przypadkach testy realizowane były na niezależnych próbkach i dla maksymalnych wartości odkształcenia 0,0065 oraz 0,009. Jak widać z tego diagramu, obciążenia kołowe dają w przypadku badanego materiału dużą nadwyżkę wartości naprężenia przy jednakowej wartości amplitudy odkształcenia w porównaniu z cyklami proporcjonalnymi (rozciąganie-ściskanie).

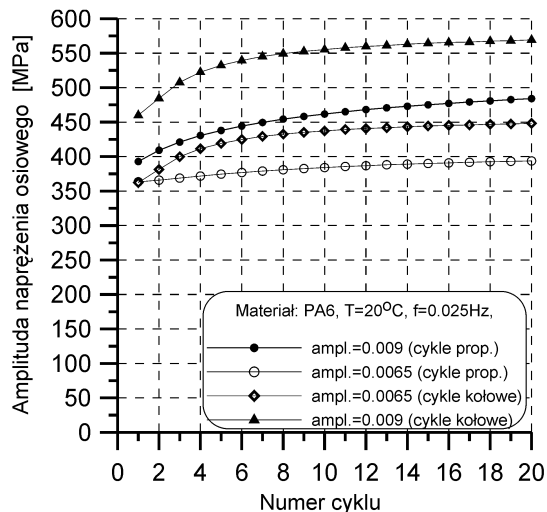
Wnioski końcowe

Różnorodność obserwowanych zachowań materiałów przy różnych formach wstępnej deformacji i ciągłe jeszcze odkrywanie nowych efektów sprawia, że zagadnienie wpływu obciążeń eksploatacyjnych na właściwości mechaniczne materiałów nadal stanowi aktualny problem zarówno od strony teoretycznej, jak i doświadczalnej. Wydaje się, że istotnym punktem prac eksperymentalnych jest proces przygotowania programu obciążeń o przebiegach odwzorowujących możliwie najlepiej te przypadki, które występują w rzeczywistych elementach konstrukcyjnych i urządzeniach. Faktem jest, że pełna kontrola z ciągłą archiwizacją przebiegów obciążeń obiektu rzeczywistego nie zawsze jest możliwa z przyczyn technicznych. Dlatego też należy poszukiwać rozwiązań będących kompromisem między rzeczywistymi warunkami pracy elementów a badaniami prowadzonymi w laboratoriach wytrzymałości materiałów. Różnorodność i wzajemne powiązania efektów towarzyszących wprowadzaniem deformacji plastycznej wskazują na prowadzenie prac eksperymentalnych o dużym stopniu komplikacji, które byłyby w stanie zidentyfikować zachodzące złożone procesy w materiale. Stąd widoczna jest konieczność powiązania technik wykorzystywanych w klasycznej wytrzymałości materiałów (np. standardowa próba rozciągania, koncepcja określania powierzchni plastyczności) z badaniami o charakterze nieniszczącym (np. metody magnetyczne, ultradźwiękowe, prądy wirowe itp.). Głębsze zrozumienie badanych zjawisk wymaga dodatkowo prowadzenia badań na poziomie mikroskopowym. Dopiero wyniki i wnioski wyciągnięte na podstawie kompleksowych prac eksperymentalnych mogą być na tyle wiarygodne, aby były przydatne w zagadnieniach np.: numerycznego modelowania ewolucji powierzchni plastyczności, oceny stanu wyężenia materiału, budowy równań konstytutywnych czy też oceny stopnia uszkodzenia rozpatrywanych materiałów.

Przykłady badań zaprezentowane w pracy, dotyczące wpływu wstępnej deformacji plastycznej na właściwości mechaniczne, pokazały, że deformacja taka może w zależności od materiału powodować efekt jego umocnienia lub osłabienia.

Pokazano na przykładzie miedzi, że jednakowy poziom deformacji wstępnej uzyskany różnymi sposobami nie gwarantuje jednakowych właściwości mechanicznych materiału.

Wśród obciążeń powodujących wstępną deformację, krytyczną ich formę stanowią obciążenia cykliczne nieproporcjonalne.



Rys. 14. Ilustracja efektu dodatkowego wzmocnienia obserwowanego przy porównaniu amplitud naprężenia w funkcji numeru cyklu dla obciążeń proporcjonalnych (rozciąganie-ściskanie) i nieproporcjonalnych po drodze kołowej

LITERATURA

1. *Michaelsen C., Hoffelner W.*: The role of state of stress for the determination of the lifetime of turbine components. Fatigue under biaxial and multiaxial loading. Mechanical Engineering Publication, London, 1991, pp. 53 – 63.
2. *Kowalewski Z. L.*: Ocena efektów działania obciążeń eksploatacyjnych w materiałach konstrukcyjnych. Przegląd Mechaniczny nr 15/1998, ss. 5 – 15,
3. *Hecker S. S.*: Experimental studies of yield phenomena in biaxially loaded metals, Constitutive equation in viscoplasticity: computational and engineering aspects. The Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, New York City, NY, December 10, AMD 20, 1976, pp. 1 – 33.
4. *Kumar A., Samanta S. K., Mallick K.*: Study of the effect of deformation on the axes of anisotropy. J. Eng. Mat. Techn., 113, 1991, pp. 187 – 191.
5. *Ishikawa H.*: Subsequent yield surface probed from its current. Int. J. Plast., 13 (6–7), 1997, pp. 533 – 549.
6. *Lin J., Kowalewski Z. L., Cao J.*: Creep rupture of copper and aluminium alloy under combined loadings—experiments and their various descriptions, Int. J. Mechanical Sciences, 47, 2005, pp. 1038–1058.
7. *Dietrich L.*: Badania właściwości mechanicznych materiałów w złożonym stanie naprężenia – identyfikacja anizotropii plastycznej, Przegląd. Mechaniczny nr 23-24/1996, ss. 7 – 14.
8. *Kowalewski Z. L., Śliwowski M., Socha G.*: Wpływ różnokierunkowej deformacji plastycznej na ewolucję powierzchni plastyczności stali 18G2A. Prace IPPT, 25, 1994, ss. 1 – 50.
9. *Trąmpczyński W.*: The experimental verification of the unloading technique for the yield surface determination. Arch. Mech. 44, 2, 171, 1992.
10. *Kowalewski Z. L.*: Efekty prędkości deformacji w badaniach stali poddanej złożonemu stanowi naprężenia. Przegląd Mechaniczny nr 22/ 1999, ss. 5 – 10.
11. *Tanaka E., Murakami S., Ooka M.*: Effects of strain path shapes on nonproportional cyclic plasticity. J. Mech. Phys. Solids, 33(6), 1985, pp. 559 – 575.
12. *Calloch S., Marquis D.*: Additional hardening due to tension-torsion nonproportional loadings: influence of the loading path shape, Multiaxial fatigue and deformation testing techniques. ASTM STP 1280, 1997, pp. 113 – 130.
13. *Aubin V., Quaegebeur P., Degallaix S.*: Cyclic plasticity of a duplex stainless steel under non-proportional loading, Mat. Sci. Engng., A346, 2003, pp. 208 – 215.
14. *Ikegami K., Niitsu Y.*: Effect of creep prestrain on subsequent plastic deformation. Int. J. Plast., 1, 1985, pp. 331 – 345.
15. *Ohashi Y., Kawai M., Shimizu H.*: Effects of prior creep on subsequent plasticity of type 316 stainless steel at elevated temperature, J. Eng. Mat. Techn., 105, 1983, pp. 257 – 263.

Dokończenie z 61 str.

16. *Winstone M.R., Harrison G. F.*: Effects of overloads and creep on the yield surface of a nickel-based superalloy [in]: Techniques for Multi-Axial Creep Testing. Ed. D. J. Gooch and I. M. How, Elsevier Applied Science, London and New York, 1986.
17. *Wu H.-C., Ho C.-C.*: Strain hardening of annealed 304 stainless steel by creep. J. Eng. Mat. Tech., 115, 1993, pp. 345 – 350.
18. *Dietrich L., Kowalewski Z. L.*: Rozwój anizotropowych własności miedzi pod wpływem deformacji plastycznej przy pełzaniu i monotonicznym obciążaniu. Prace IPPT, 23, 1994, ss. 1 – 42.

