XXII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania
Bydgoszcz - Pieczyska, maj 2008, ss. 237-244

Stanisław MROZIŃSKI

WPŁYW STABILIZACJI MOSIĄDZU M63 NA WYNIKI OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

W pracy przedstawiono wyniki badań mających na celu określenie wpływu okresu trwałości przyjętego do określenia danych materiałowych na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej. Uzyskane wyniki badań oraz obliczeń uwidoczniły, że wpływ ten zależy w sposób istotny od parametrów programu obciążenia.

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny,
al. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

Ocena trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w ujęciu odkształceniowym wymaga przyjęcia szeregu danych materiałowych. Określa się je podczas badań niskocyklowych próbek poddanych zmiennym odkształceniom lub naprężeniom z okresu stabilizacji własności cyklicznych. Z badań własnych autora wynika, że dla wielu metali istnienie okresu stabilizacji jest określeniem czysto umownym. Okres stabilizacji występuje bowiem bardzo krótko, a częstokroć nie występuje wcale. W takim przypadku niezbędne do określenia danych materiałowych parametry pętli pobiera się najczęściej z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej. W taki sposób określone dane materiałowe odzwierciedlają własności cykliczne materiału jedynie z krótkiego okresu trwałości, w którym zostały one wyznaczone. Może to w konsekwencji powodować rozrzut wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań, a na jego wielkość może mieć wpływ wybór okresu trwałości, w którym zostają określone niezbędne dane materiałowe.

Celem pracy jest ocena doświadczalna wpływu okresu trwałości przyjętego do określenia danych materiałowych na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej.

2. ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Jedną z metod obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, w której wykorzystuje się dane materiałowe określane podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych, jest metoda bazująca na analizie lokalnych odkształceń i naprężeń [1]. Wyniki obliczeń trwałości uzyskiwane tą metodą są uzależnione od wartości odkształcenia ε i naprężenia σ występującego w miejscu prawdopodobnej inicjacji pęknięcia. Lokalne odkształcenia ε i naprężenia σ trudno zmierzyć w bezpośredni sposób i z tego względu określa się je w sposób pośredni. Obecnie istnieje kilka koncepcji ich wyznaczania. Najbardziej znaną i najczęściej stosowaną jest koncepcja Neubera [2], która wiąże naprężenia lokalne w karbie σ i nominalne S przy wykorzystaniu tzw. hiperboli Neubera o postaci:

$$\sigma \cdot \varepsilon = K_f^2 S^2 / E \tag{1}$$

Do analitycznego opisu cyklicznych własności materiału wykorzystuje się modele jedno- lub dwuparametrowe. Najczęściej stosowanym podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych jest model Ramberga-Osgooda [3] o postaci:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \tag{2}$$

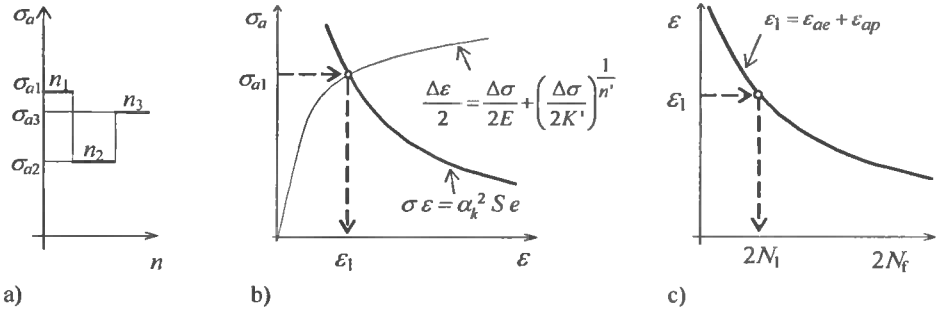
Rozwiązanie układu równań (1) i (2) pozwala określić poziom odkształceń ε występujących w karbie, a następnie z równania wykresu zmęczeniowego trwałość zmęczeniową. Najbardziej znanym opisem wykresu wykorzystywanym podczas obliczeń trwałości jest równanie Mansona-Coffina-Basquina [4]:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{ac}}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_{ae}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_{ap}}{2} = \frac{\sigma_f'}{E}\left(2N_f\right)^b + \varepsilon_f'\left(2N_f\right)^c \tag{3}$$

Obliczenia trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążenia programowanego związane są z sumowaniem uszkodzeń zmęczeniowych. Najczęściej stosowaną jest hipoteza liniowa Palmgrena-Minera [5, 6]. Zakłada ona, że w przypadku obciążenia stałoamplitudowego każdy cykl obciążenia, niezależnie od fazy zmęczenia, w jednakowym stopniu przyczynia się do uszkodzenia. Oznacza to, że uszkodzenie jest liniową funkcją liczby cykli, co w przypadku wielostopniowego programu obciążenia można zapisać jako:

$$D_i = \lambda \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = 1 \tag{4}$$

Schemat ilustrujący wyżej omówioną metodę obliczeń trwałości zmęczeniowej pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Obliczenia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych: a) program obciążenia, b) określanie odkształceń lokalnych w karbie, c) określanie trwałości zmęczeniowej dla obciążeń pierwszego stopnia programu

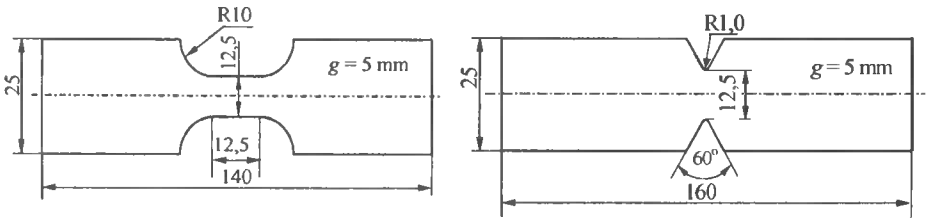
Z analizy rysunku wynika, że bezpośredni wpływ na poziom odkształceń i naprężeń na dnie karbu mają między innymi parametry wykresu cyklicznego odkształcenia n' i K'. Ich wartości zależą od parametrów pętli histerezy σ_a i ε_{ap} uzyskanych na różnych poziomach odkształcenia lub naprężenia, a następnie aproksymowanych w układzie współrzędnych bilogarytmicznych prostymi regresji o postaci opisanej równaniem:

$$\varepsilon_{ap} = \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \tag{5}$$

Brak okresu stabilizacji oraz zmiany własności cyklicznych w funkcji liczby cykli obciążenia powodują, że wartości n' i K' zależą od okresu trwałości przyjętego do ich określenia.

3. OPIS BADAŃ

Próbki do badań zmęczeniowych wykonano z mosiądzu M63. Przygotowano próbki gładkie (bez karbu) oraz z karbem. Ich kształt pokazano na rysunku 2.

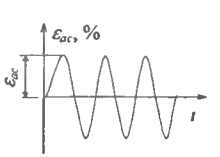
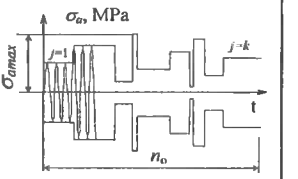


Rys. 2. Próbki do badań zmęczeniowych: a) do badań stałoamplitudowych, b) do badań programowanych

Podczas badań stosowano obciążenia stałoamplitudowe oraz programowane. Celem badań zmęczeniowych w warunkach obciążeń stałoamplitudowych było wykonanie wykresu zmęczeniowego w układzie współrzędnych $2N_f - \varepsilon$ oraz określenie, w różnych okresach trwałości, danych materiałowych wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej. Badania stałoamplitudowe przeprowadzono zgodnie z [7] na pięciu poziomach kontrolowanego odkształcenia całkowitego.

Celem badań zmęczeniowych w warunkach obciążeń programowanych było uzyskanie wyników trwałości zmęczeniowej próbek z karbem dla zróżnicowanych parametrów programów obciążenia. Obciążenia programowane charakteryzowano wartością maksymalnej amplitudy naprężenia σ_{amax} w jednym bloku programu obciążenia oraz współczynnikiem wypełnienia widma obciążenia ζ. Parametry obciążeń stałoamplitudowych i programowanych zestawiono w tabeli 1.

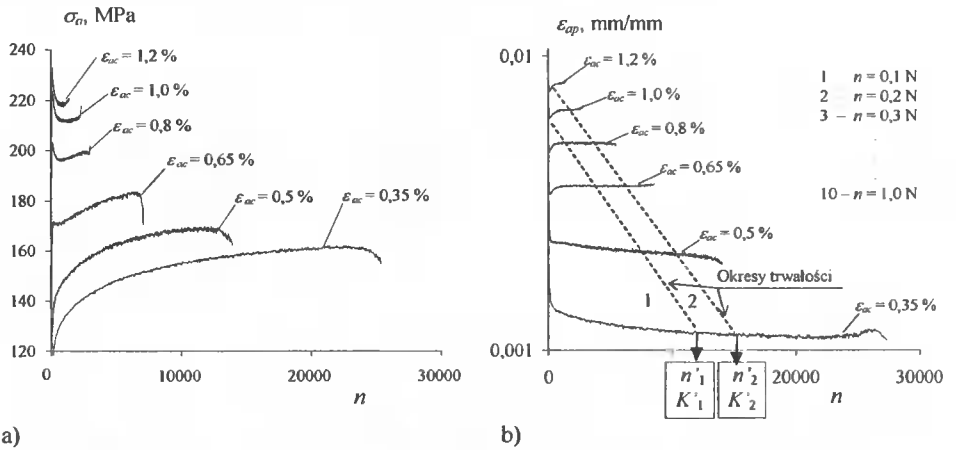
Tabela 1. Parametry programów obciążenia

Obciążenie stałoamplitudowe		Obciążenie programowane	
schemat	parametry	schemat	parametry
	ε_{ac} = 0,35% ε_{ac} = 0,5% ε_{ac} = 0,8% ε_{ac} = 1,0% ε_{ac} = 2,0% f = 0,2 Hz		σ_{amax} = 100 MPa σ_{amax} = 130 MPa ζ = 0,34 ζ = 0,56 ζ = 0,77 n_0 = 100 k = 10 f = 1 Hz

Badania stałoamplitudowe i programowane wykonano na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej Instron. Podczas testów stałoamplitudowych rejestracji podlegały wybrane cykle obciążenia, natomiast podczas badań w warunkach obciążeń programowanych rejestrowano całe wybrane bloki obciążenia o pojemności $n_0 = 100$ cykli.

4. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rysunku 3 pokazano przykładowe przebiegi zmian amplitudy naprężenia σ_a i odkształcenia plastycznego ε_{ap} w funkcji liczby cykli obciążenia. Zgodnie z oczekiwaniami przyjęty do badań materiał cechował się brakiem wyraźnego okresu stabilizacji.



Rys. 3. Zmiany parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia:
a) $\sigma_a = f(n)$, b) $\varepsilon_{ap} = f(n)$

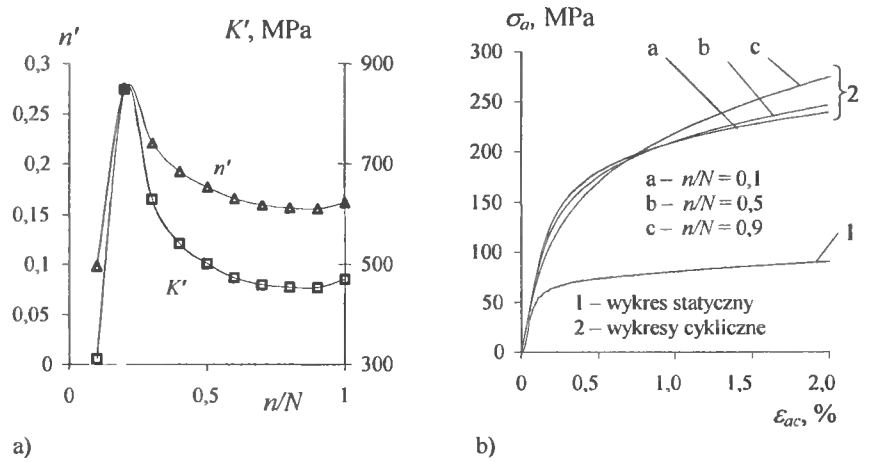
Na podstawie analizy zmian naprężenia i odkształcenia można stwierdzić, że własności cykliczne mosiądzu zależą od poziomu odkształcenia. Dla odkształceń $\varepsilon_{ac} < 1\%$ mosiądz podlega cyklicznemu umocnieniu, natomiast dla odkształceń $\varepsilon_{ac} > 1\%$ widoczne jest jego nieznaczne osłabienie. Ze względu na brak wyraźnego okresu stabilizacji niezbędne do wykonania wykresu zmęczeniowego opisanego równaniem (3) amplitudy odkształceń plastycznych ε_{ap} i sprężystych ε_{ae} określono na poszczególnych poziomach odkształcenia z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej $n/N = 0,5$. Wyniki badań opracowano metodą najmniejszych kwadratów. Wyznaczone współczynniki i wykładniki równania (3) zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości parametrów wykresu zmęczeniowego opisanego równaniem (3)

b	c	ε_f'	σ_f'/E
–0,1711	–0,6045	1,020	0,1146

Zależność pomiędzy odkształceniem plastycznym ε_{ap} i amplitudą naprężenia σ_a opisaną równaniem (5) określono w dziesięciu okresach rozmieszczonych równomiernie w całym zakresie trwałości zmęczeniowej. Przyjętą metodę postępowania wyjaśniono na rysunku 3b. Okresy trwałości przyjęte do określania parametrów pętli histerezy σ_a i ε_{ap}

na poszczególnych poziomach odkształcenia definiowano przy wykorzystaniu trwałości względnej n/N. Wyznaczone w różnych okresach trwałości n/N wartości parametrów n' i K' równania (5) przedstawiono w formie wykresów na rysunku 4.

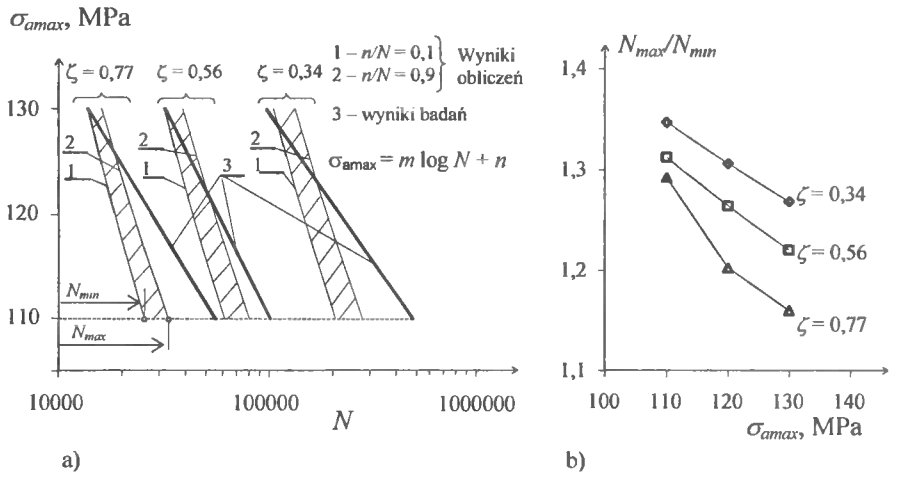


Rys. 4. Wpływ okresu trwałości n/N na własności cykliczne: a) wartości n' i K' w różnych okresach trwałości zmęczeniowej, b) wpływ okresu trwałości na analityczny opis odkształceń

Zróżnicowanie wartości parametrów n' i K' w zależności od okresu trwałości n/N powoduje, że analityczny opis odkształceń na dnie karbu przy wykorzystaniu równania (2) zależy również od okresu trwałości przyjętego do określenia parametrów n' i K'. Na rysunku pokazano przykładowe wykresy cyklicznego odkształcenia uzyskane z wykorzystaniem n' i K' z różnych okresów trwałości.

5. OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Oceny wpływu przebiegu stabilizacji na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej dokonano wykonując obliczenia z wykorzystaniem danych materiałowych określonych w różnych okresach trwałości. Podczas obliczeń wykorzystano liniową hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Opis postępowania przyjęty podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej omówiono w punkcie 2. Wykresem bazowym podczas sumowania uszkodzeń zmęczeniowych był wykres zmęczeniowy opisany równaniem (3) o parametrach zestawionych w tabeli 2. Niezależne obliczenia trwałości prowadzono dla każdej z 10 sekwencji parametrów n' i K' określonych w różnych okresach trwałości. Uzyskane wyniki analizowano w aspekcie wpływu okresu trwałości na wyniki obliczeń trwałości oraz porównując je z wynikami badań. Na rysunku 5 pokazano wykresy zmęczeniowe uzyskane z obliczeń oraz badań. W celu przejrzystości rysunku naniesiono na nim wykresy zmęczeniowe uzyskane podczas obliczeń z wykorzystaniem danych materiałowych określonych w dwóch skrajnych okresach trwałości, tj. dla $n/N = 0{,}2$ oraz $n/N = 0{,}9$.



Rys. 5. Wyniki obliczeń i badań: a) wpływ okresu n/N na wyniki obliczeń, b) zależność N_{max}/N_{min} od poziomu σ_{amax}

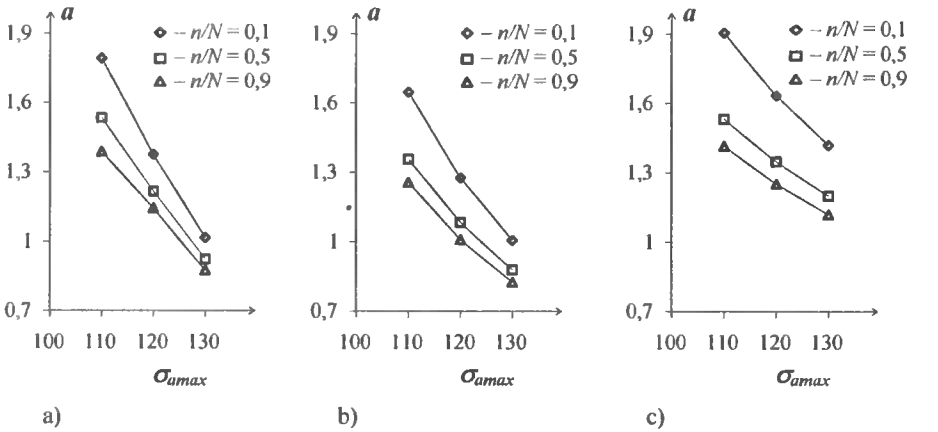
Miarą wpływu okresu trwałości, przyjętego do określenia danych materiałowych, na otrzymane wyniki obliczeń trwałości są obszary zakreskowane pomiędzy wykresami 1 i 2 uzyskanymi z obliczeń z wykorzystaniem danych z dwóch okresów trwałości. Analiza porównawcza położenia uzyskanych wykresów wykazała, że wpływ okresu trwałości przyjętego do określenia danych materiałowych zależy od poziomu amplitudy naprężenia maksymalnego σ_{amax} występującego w programie oraz współczynnika wypełnienia widma ζ. Wpływ ten wzrasta w miarę obniżania poziomów naprężenia σ_{amax} oraz współczynnika ζ. Powyższe zilustrowano na rysunku 5b w postaci wykresów przedstawiających wartości N_{max}/N_{min} na trzech poziomach naprężenia maksymalnego σ_{amax} występującego w programie obciążenia.

Dla danych materiałowych określonych w skrajnych okresach trwałości ($n/N = 0{,}2$ i $n/N = 0{,}9$) oraz programu obciążenia o parametrach $\zeta = 0{,}34$ i $\sigma_{amax} = 110$ MPa zróżnicowanie uzyskanych wyników obliczeń trwałości wynosi około 35%.

Wpływ okresu trwałości przyjętego do określania danych materiałowych na wyniki jej obliczeń powoduje w konsekwencji, że ma on również wpływ na zgodność wyników obliczeń i badań. Analiza porównawcza trwałości zmęczeniowej uzyskanej z obliczeń (N_{obl}) i z badań (N_{exp}) wskazuje, że ich zróżnicowanie zależy od poziomu naprężenia maksymalnego σ_{amax}, współczynnika ζ oraz okresu trwałości n/N przyjętego do określenia danych materiałowych. Jako miarę wpływu przyjętego do określania danych materiałowych okresu trwałości na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej przyjęto rozrzut parametru a określanego z zależności:

$$a = \frac{N_{exp}}{N_{obl}} \tag{6}$$

Na rysunku 6 pokazano uzyskane wyniki w postaci wykresów wartości parametru a dla różnych poziomów σ_{amax} i współczynnika ζ.



Rys. 6. Zmiany parametru a w zależności od parametrów programu obciążenia i okresu trwałości n/N: a) $\zeta = 0{,}77$, b) $\zeta = 0{,}56$, c) $\zeta = 0{,}34$

Wpływ okresu przyjętego do określania danych materiałowych na wyniki obliczeń widoczny jest zarówno na najniższych, jak również najwyższych poziomach naprężenia σ_{amax}. Jest on niewielki w przypadku programów o największej wartości naprężenia σ_{amax} i współczynnika wypełnienia widma ξ. Wpływ ten wzrasta w miarę zmniejszania poziomów naprężeń σ_{amax} oraz wartości współczynnika ζ.

Dla programów obciążenia o naprężeniu $\sigma_{amax} = 110$ MPa wartość parametru $a = N_{exp}/N_{obl}$ uzyskanego dla skrajnych okresów trwałości ($n/N = 0{,}2$ oraz $n/N = 0{,}9$) mieści się w przedziale $1{,}35 < a < 1{,}8$ dla $\zeta = 0{,}77$ oraz w przedziale $1{,}45 < a < 1{,}9$ dla $\zeta = 0{,}34$.

6. PODSUMOWANIE

Zmienność parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia powoduje, że wartości danych materiałowych wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej zależą od okresu trwałości, w którym je określono. W konsekwencji na wyniki obliczeń trwałości, jak również na ich zgodność z wynikami badań ma wpływ okres trwałości przyjęty podczas opracowywania wyników stałoamplitudowych badań zmęczeniowych.

Wpływ okresu przyjętego do określenia danych materiałowych zależy od poziomu amplitudy naprężenia σ_{amax} występującego w programie oraz współczynnika wypełnienia widma ζ. Wpływ ten wzrasta w miarę obniżania poziomów naprężenia σ_{amax} oraz współczynnika ζ.

Największą zgodnością charakteryzują się wyniki obliczeń i badań uzyskane dla programów obciążenia o najwyższych poziomach σ_{amax} i ζ. Zróżnicowanie wyników obliczeń i badań wzrasta w miarę obniżania poziomu naprężenia σ_{amax} w programie oraz współczynnika ζ.

Najmniejszą zgodność wyników obliczeń i badań na najniższych poziomach naprężenia uzasadnić można wielokrotnym sumowaniem błędów odwzorowania wielkości kryterialnych, jakimi są odkształcenie ε i naprężenie σ na dnie karbu. Może być to również spowodowane faktem, że największe zmiany parametrów pętli histerezy (σ_a,

ε_{ap}) w funkcji liczby cykli obciążenia występują dla badanego materiału na najniższych poziomach odkształcenia (rys. 3).

Na wzrost rozbieżności wyników trwałości uzyskanych z obliczeń i badań wraz z obniżeniem poziomu naprężenia σ_{amax} i współczynnika ζ może mieć również wpływ sama metoda obliczeń trwałości, polegająca na ekstrapolowaniu własności materiału określonych w obszarze zmęczenia niskocyklowego z dominującymi odkształceniami sprężysto-plastycznymi i związanymi z tym zmianami własności cyklicznych w obszar trwałości, w którym dominują odkształcenia sprężyste.

LITERATURA

[1] Tucker L.E., 1972. A Procedure for Designing Against Fatigue Failure of Notched Parts. Society of Automotive Engineers Inc., SAE Paper No 720265, New York.
[2] Neuber H., 1961. Theory of stress concentration for shear strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain low. Journal of Applied Mechanics E 28(4), 544-550.
[3] Ramberg W., Osgood W.R., 1943. Description of stress-strain curves by three parameters. NACA, Tech. Note 402.
[4] Manson S.S., 1953. Behaviour of materials under conditions of thermal stress. NACA, Tech. Note 2933.
[5] Palmgren A., 1924. Die Lebensdauer von Kugellagem. Verfahrenstechnik VDI-Z 68, Berlin, 339-341.
[6] Miner M.A., 1945. Cumulative Damage in Fatigue. Transactions of the American Society of Mechanicals Engineers, Journal of Applied Mechanics 67, 159-164.
[7] ASTM E606-92: Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing.

Praca została wykonana w ramach grantu finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N501 040 31/2563 w latach 2006-2009.