

WPLYW PARAMETRÓW PROGRAMOWANEGO PRZEBIEGU OBCIĄŻENIA NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ

BOGUMIŁA KUŹNICKA

*Instytut Materialoznawstwa
i Mechaniki Technicznej
Politechniki Wrocławskiej*

Wykaz oznaczeń

- n_i — liczba cykli zmian naprężenia o wartości σ_{ai}
 n_0 — liczba cykli w bloku programu naprężeń.
 σ_{ai} — wartość amplitudy naprężeń odpowiadająca i -temu stopniowi w programie naprężeń
 ξ — współczynnik wypełnienia widma
 N_c — sumaryczna liczba cykli do złomu próbek przy obciążeniach programowanych
 σ_{ap} — wartość amplitudy naprężenia odpowiadająca pierwszemu stopniowi programowanego przebiegu naprężenia
 N_G — graniczna (bazowa) liczba cykli

1. Wstęp

Badania zmęczeniowe przy programowanych przebiegach obciążenia prowadzone są w celu wyznaczenia własności zmęczeniowych materiałów i trwałości eksploatacyjnej elementów konstrukcji przenoszących losowo zmienne obciążenia. Obecnie stosowane metody badań programowanych polegają na zastąpieniu eksploatacyjnych przebiegów obciążenia przebiegami sinusoidalnymi o zmiennej amplitudzie (tzw. blokowymi przebiegami obciążenia), różnego rodzaju przebiegami pseudolosowymi lub losowymi o danych charakterystykach statystycznych. Szereg względów przemawia za realizacją metod badań przy blokowym przebiegu obciążenia, z których najważniejsze to: możliwość znacznego przyspieszenia badań i ich niski koszt, wynikający z zastosowania mało skomplikowanych urządzeń.

Zastąpienie obciążeń eksploatacyjnych obciążeniami sinusoidalnymi o zmiennej amplitudzie wymaga między innymi odpowiedniego doboru parametrów programu obciążenia [1], od których zależy zgodność trwałości wyznaczonej w badaniach programowanych z trwałością eksploatacyjną. W literaturze można znaleźć pewne wskazówki (opracowane na podstawie badań), dotyczące modelowania obciążeń, które w pewnym stopniu norma-

lizują programowane przebiegi obciążenia. Stosowanie tych wskazówek jest korzystne głównie z punktu widzenia możliwości późniejszego porównywania wyników badań, a także odtwarzania samych badań.

O niedoskonałości stosowanych metod opracowywania programów obciążenia świadczą różnice (w niektórych przypadkach bardzo istotne [2, 3]) w trwałościach zmęczeniowych, wyznaczonych przy eksploatacyjnych przebiegach obciążenia i zastępujących je przebiegach programowanych. Wnioski wynikające z badań wpływu parametrów programu obciążenia na trwałość zmęczeniową, w wielu przypadkach różnią się, a nawet są sprzeczne [4]. Przyczyną sprzeczności jest prawdopodobnie fakt, że wpływ każdego z parametrów programu obciążenia na trwałość zależy od doboru wartości pozostałych parametrów. Utrudnia to wyciągnięcie prawidłowych wniosków z badań, w których zmienny jest tylko jeden z parametrów programu. Ponadto w wielu pracach wyniki badań nie były poddawane analizie statystycznej. Stąd też interpretacja istotności uzyskiwanych różnic w wynikach (zwłaszcza przy dużych rozrzutach charakterystycznych dla badań programowanych) w przypadkach niektórych prac może być tendencyjna. Dlatego pożądane jest prowadzenie badań pozwalających określić związki między poszczególnymi parametrami przy wyznaczaniu ich wpływu na trwałość zmęczeniową oraz dokładniejsze opracowywanie ich wyników.

Dane literaturowe zebrane w pracy [4] wskazują, że najwięcej niejasności i rozbieżności zdań jest we wnioskach dotyczących wpływu sekwencji obciążeń na trwałość zmęczeniową. Poza tym brak jest danych dotyczących:

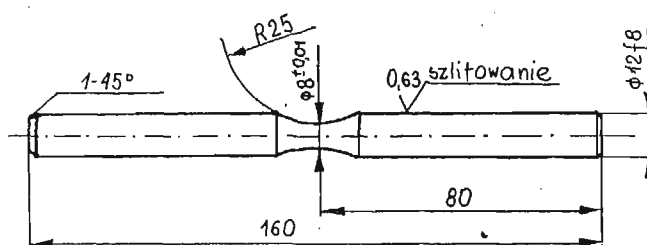
- wpływu pierwszego stopnia obciążenia w programie na trwałość zmęczeniową oraz zależności tego wpływu od rodzaju sekwencji obciążeń w programowanym przebiegu i zakresu wartości występujących w nim obciążeń,
- wpływu parametrów programu obciążenia na trwałość w zależności od rodzaju materiału.

Należy również zaznaczyć, że w wielu pracach, których autorzy oceniali wpływ poszczególnych parametrów programu obciążenia na przebieg krzywych trwałości zmęczeniowej, przyjmowano do badań bloki obciążenia o stałej liczbie cykli, niezależnie od wartości obciążenia maksymalnego $\sigma_{a \max}$ w przebiegu. W takim przypadku ze zmianą wartości obciążenia $\sigma_{a \max}$ w programie zmieniała się liczba powtórzeń bloku do złomu, co mogło mieć dodatkowy wpływ na przebieg krzywych trwałości. Celowe jest więc doświadczalne sprawdzenie, czy przebieg krzywych trwałości, wyznaczonych przy programach o stałej liczbie cykli w bloku, różni się od przebiegu krzywych, wyznaczonych przy blokach o liczbie cykli dobranej tak, aby powtarzalność bloku była stała (niezależnie od wartości obciążenia $\sigma_{a \max}$).

Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu wybranych parametrów przebiegu naprężenia: sekwencji naprężeń, stopnia naprężenia rozpoczynającego przebieg oraz liczby cykli w bloku na trwałość zmęczeniową. Przyjęty program badań zakładał ustalenie, czy wpływ każdego z tych parametrów (z osobna) na trwałość zależy od doboru dwóch pozostałych parametrów oraz od wartości naprężeń występujących w przebiegu i rodzaju materiału.

2. Przebieg badań

2.1. **Urządzenie i próbki.** Badania zmęczeniowe przeprowadzono na czterowrzecionowej maszynie UBM. (produkcji NRD) przeznaczonej do badań przy obrotowym zginaniu. Kształt i wymiary badanych próbek przedstawiono na rys. 1. Próbki wykonano z duralu PA6N (w stanie po starzeniu samorzutnym) oraz mosiądzu MO58 (w stanie wyżarzonym). Przy wyborze materiałów wzięto pod uwagę fakt, że w przypadku wybranych materiałów przebieg krzywych zależności odkształceń sprężystych i plastycznych od liczby cykli, jest różny [5, 6]. Można więc było spodziewać się, że proces zmęczenia przy programowanych przebiegach obciążenia będzie przebiegał w obydwu stopach odmiennie. Własności mechaniczne badanych stopów, wyznaczone po obróbce cieplnej, podano w tabelcy 1.



Rys. 1. Kształt i wymiary badanych próbek

Tabela 1

Własności mechaniczne duralu PA6N i mosiądzu MO58

Materiał	Własności wytrzymałościowe			Własności plastyczne		
	R [MPa]	R _{0,2} [MPa]	E [MPa]	A [%]	Z [%]	HV ₁₀ [MPa]
PA6N	407	254	5,74 · 10 ⁴	22	39	1690
MO58	392	125	7,82 · 10 ⁴	42	38	1060

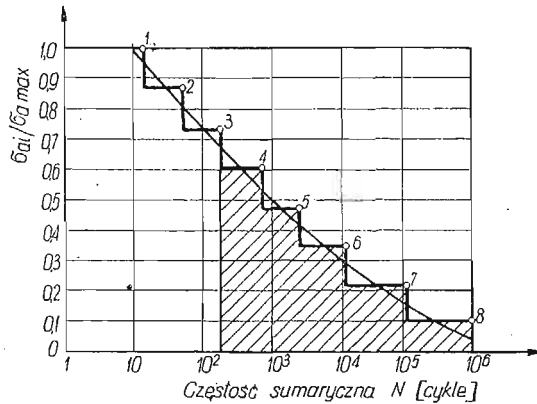
2.2. **Program badań.** Całość zrealizowanych badań można podzielić na dwa etapy:

- w pierwszym wyznaczono krzywe Wöhlera duralu i mosiądzu w zakresie ograniczonej i nieograniczonej ($N_G = 5 \cdot 10^7$ cykli dla PA6N, $N_G = 5 \cdot 10^7$ cykli dla MO58) wytrzymałości zmęczeniowej, potrzebne do opracowania programu dalszych badań,
- w drugim wyznaczono krzywe trwałości zmęczeniowej przy programowych przebiegach naprężenia o różnych parametrach, w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej.

Warunki badań programowanych opracowano koncentrując się bardziej na wartościach poznawczych uzyskiwanych wyników, niż możliwości bezpośredniego ich wykorzystania w praktyce. Wobec powyższego, w celu wyznaczenia zależności wpływu sekwencji na trwałość zmęczeniową od wartości pierwszego stopnia naprężenia w przebiegu

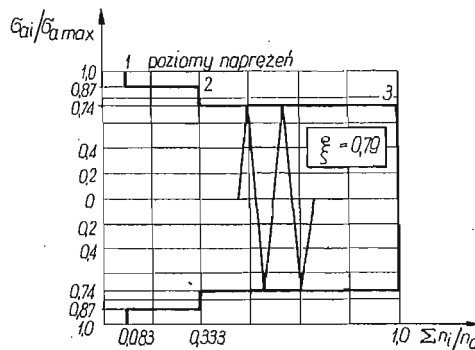
(dla różnych zakresów wartości naprężeń), dobrano pozostałe parametry przebiegu (liczbę cykli w bloku, liczbę stopni naprężenia w przebiegu) tak, aby sprzyjały one wystąpieniu wpływu sekwencji.

Dane literaturowe zebrane w pracy [4] sugerują, że wpływ sekwencji jest tym większy, im mniejsza jest powtarzalność bloku przebiegu do złomu oraz im mniejsza jest liczba stopni w bloku. Dlatego przyjęto do badań trzystopniowe przebiegi naprężenia. Liczbę cykli w bloku dobierano tak, aby średnia jego powtarzalność do złomu była trzykrotna, niezależnie od wartości naprężeń występujących w przebiegu. Nie dotyczy to przebiegów naprężenia, w przypadku których zwiększenie powtarzalności bloku do złomu było celowe (określenie wpływu sekwencji w zależności od liczby cykli w bloku).



Rys. 2. Dwumianowy rozkład częstości sumarycznej w układzie półlogarymicznym i aproksymujący go 8-stopniowy rozkład częstości

Ponieważ względna powtarzalność poszczególnych wartości naprężenia w bloku może mieć wpływ na uzyskiwane wyniki, całkowite liczby cykli w bloku podzielono między poszczególne stopnie naprężenia według krzywej półlogarymicznego rozkładu dwumianowego (rys. 2), stosowanego przez Gassnera [7]. Z danych doświadczalnych przedstawionych w pracy [1] (s. 62) wynika, że przy wysokich wartościach stosunku $\sigma_{a\max}/Z_{g0}$ wpływ naprężeń niższych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęcze-



Rys. 3. Histogram amplitud naprężenia przyjęty w badaniach własnych

niową jest niewielki. Wobec powyższego, w celu skrócenia czasu badań pominięto w przyjętym rozkładzie naprężenia o amplitudzie $\sigma_{ai} < 0,74 \sigma_{a \max}$ (zakreskowana na rys. 2 część wykresu). W rezultacie najniższe naprężenia w przebiegach o określonych wartościach $\sigma_{a \max}$ osiągały najniższą wartość równą nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Na rys. 3 pokazano przyjęty do badań histogram naprężeń, na podstawie którego opracowano wszystkie przebiegi naprężenia zrealizowane w badaniach własnych.

Wpływ sekwencji naprężeń na trwałość stopów PA6N i MO58 określono realizując przebiegi o rosnącej (SR) i malejącej (SM) kolejności następowania poszczególnych stopni naprężenia (rys. 4). Dla każdego rodzaju sekwencji przyjęto:

a) trzy wartości naprężenia maksymalnego w przebiegu:

$$\sigma_{a \max} = 1,60; 1,48; 1,36 Z_{go} \text{ dla stopu PA6N,}$$

$$\sigma_{a \max} = 1,53, 1,42; 1,31 Z_{go} \text{ dla stopu MO58,}$$

b) trzy wartości naprężenia rozpoczynającego przebieg (rys. 4):

$$\sigma_{ap} = \sigma_{a \max}; \sigma_{a sr}; \sigma_{a min}$$

c) liczbę cykli w bloku n_0 :

— stałą (w pierwszej serii badań) dla wszystkich wartości $\sigma_{a \max}$ dobrana tak, aby średnia powtarzalność bloku do złomu przy najwyższej wartości $\sigma_{a \max}$ była trzykrotna, czyli:

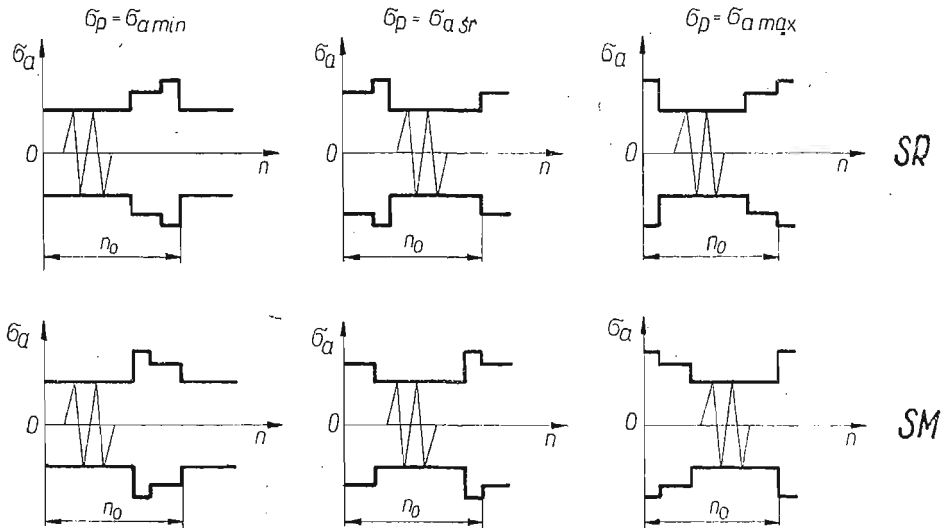
$$n_0 = 4,2 \cdot 10^5 \text{ cykli dla duralu PA6N,}$$

$$n_0 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ cykli dla mosiądzu MO58,}$$

— zależną od wartości $\sigma_{a \max}$, tzn. dobraną tak, aby średnia powtarzalność bloku do złomu była trzykrotna dla każdej wartości $\sigma_{a \max} (n_0 \sim N)$, mianowicie:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{a \max} = 1,60 Z_{go}; 1,48 Z_{go}; 1,36 Z_{go}, \\ n_0 = 4,2 \cdot 10^5; 6,0 \cdot 10^5; 1,2 \cdot 10^6 \text{ cykli} \end{array} \right\} \text{ dla PA6N,}$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{a \max} = 1,53 Z_{go}; 1,42 Z_{go}; 1,31 Z_{go}, \\ n_0 = 1,2 \cdot 10^5; 3,6 \cdot 10^5; 9,6 \cdot 10^5 \text{ cykli} \end{array} \right\} \text{ dla MO58,}$$



Rys. 4. Schemat przebiegów naprężenia zastosowanych w badaniach

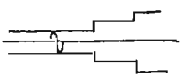
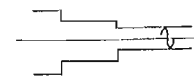
Tak zaprojektowany program badań umożliwił określenie — oprócz wpływu sekwencji naprężeń na trwałość w zależności od wybranych parametrów przebiegu naprężenia — również wpływu stopnia naprężenia rozpoczynającego przebieg i czasu trwania bloku przebiegu przy różnych rodzajach sekwencji naprężeń. Badania przeprowadzono przyjmując 5-8 próbek na każdy poziom naprężenia σ_{amax} , w zależności od rozrzutu wyników.

Oceny wpływu poszczególnych parametrów przebiegu na trwałość dokonywano porównując położenie uzyskanych przy programowanych przebiegach naprężenia, krzywych trwałości zmęczeniowej w układzie $\sigma_{amax} - \log N_c$.

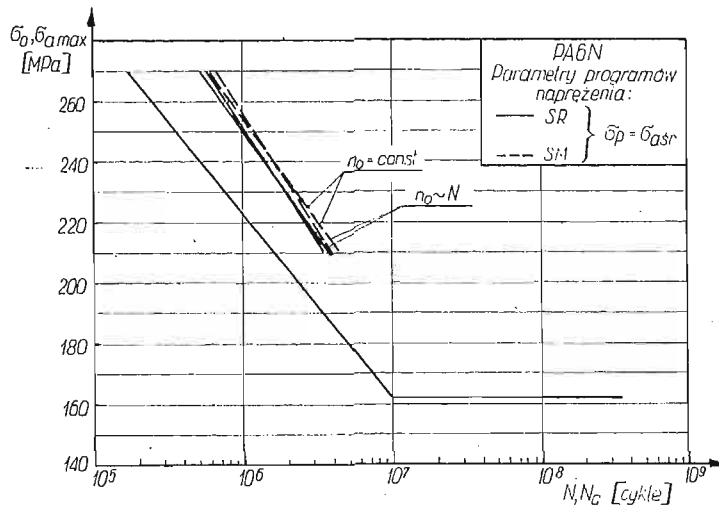
2.3. Opracowanie wyników badań. W opracowaniu wyników badań zastosowano metodę najmniejszych kwadratów przy założeniu liniowego przebiegu funkcji: $\sigma_a = f(\log N)$, $\sigma_{amax} = f(\log N_c)$. Otrzymano w ten sposób proste regresji i odpowiadające im przedziały ufności wartości średnich i pojedynczych spostrzeżeń na poziomie istotności 95%. Równania tych prostych zestawiono w tablicy 2. Dla przykładu na rys. 5 i 6 przedstawiono zestawienie niektórych prostych, otrzymanych dla obydwu badanych materiałów przy przebiegach naprężenia, w których zmianie ulegały dwa parametry przebiegu: sekwencja naprężeń i liczba cykli w bloku. Dla orientacji na rysunkach pokazano również przebieg krzywej Wöhlera odpowiedniego materiału. Następnie przeprowadzono szczegółową analizę statystyczną wpływu rozpatrywanego parametru przebiegu naprężenia na położenie

Tablica 2

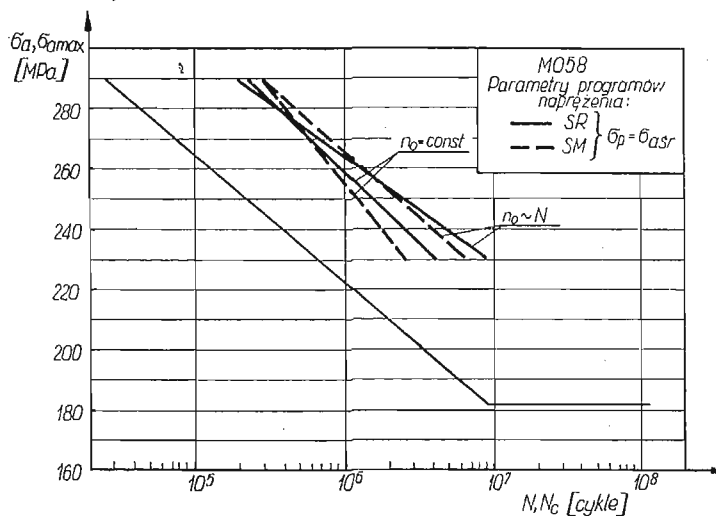
Równania prostych regresji, wyznaczone dla zrealizowanych w badaniach programowych przebiegów naprężenia

Materiał	Naprężenie początkowe σ_{ap}	 SR		 SM	
		$n_0 = \text{const}$	$n_0 \sim N$	$n_0 = \text{const}$	$n_0 \sim N$
PA6N	$\sigma_{a \min}$		$\hat{y} = 9,95798 - 0,01498x$		$\hat{y} = 10,63809 - 0,01795x$
	$\sigma_{a \text{ sr}}$	$\hat{y} = 9,52983 - 0,01402x^{*)}$	$\hat{y} = 9,43671 - 0,01361x$	$\hat{y} = 9,32545 - 0,01303x$	$\hat{y} = 9,70012 - 0,01453x$
	$\sigma_{a \max}$		$\hat{y} = 9,46749 - 0,01362x$		$\hat{y} = 8,81307 - 0,01128x$
MOSS	$\sigma_{a \min}$		$\hat{y} = 12,56535 - 0,02479x$		$\hat{y} = 11,20887 - 0,02025x$
	$\sigma_{a \text{ sr}}$	$\hat{y} = 11,30797 - 0,02047x$	$\hat{y} = 13,24079 - 0,02737x$	$\hat{y} = 10,23683 - 0,01652x$	$\hat{y} = 12,25855 - 0,02359x$
	$\sigma_{a \max}$		$\hat{y} = 10,83073 - 0,01901x$		$\hat{y} = 12,41563 - 0,02512x$

*) $\hat{y} = \log N_c$, $x = \sigma_{amax}$



Rys. 5. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla duralu PA6N przy przebiegach naprężenia, w których liczba cykli w bloku: $n_0 = \text{const} = 4,2 \cdot 10^5$ cykli oraz $n_0 \sim N$ ($n_0 = 4,2 \cdot 10^5; 6,0 \cdot 10^5; 1,2 \cdot 10^6$ cykli odpowiednio dla: $\sigma_{a,max} = 260, 240, 220$ MPa).



Rys. 6. Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone dla mosiądzu M05B przy przebiegach naprężenia, w których liczba cykli w bloku: $n_0 = \text{const} = 1,2 \cdot 10^5$ cykli oraz $n_0 \sim N$ ($n_0 = 1,2 \cdot 10^5; 3,6 \cdot 10^5; 9,6 \cdot 10^5$ cykli odpowiednio dla $\sigma_{a,max} = 280, 260, 240$ MPa).

uzyskanych prostych regresji. Statystyczna ocena różnic trwałości zmęczeniowej, uzyskanej przy przebiegach naprężenia o różnych parametrach, polegała na porównaniu położenia odpowiednich prostych regresji. Porównanie dwóch lub trzech (w zależności od rodzaju parametru, którego wpływ był analizowany) prostych regresji obejmowało:

- porównanie współczynników kierunkowych tych prostych testem t -Studenta w przypadku dwóch prostych i testem istotności F dla (kilku średnich) w przypadku trzech prostych [8],
- porównanie średnich generalnych tych prostych przy pomocy wymienionych wyżej testów.

W przypadku stwierdzenia, że trzy proste są równoległe oraz że różnica między ich średnimi generalnymi jest istotna, dalsze postępowanie polegało na sprawdzeniu, między którymi z porównywanych średnich różnica jest istotna. Zastosowano do tego celu wielokrotny test rozstępu Duncana [9].

W przypadku stwierdzenia, że różnice w nachyleniu prostych są istotne, porównania średnich dokonywano na każdym poziomie naprężenia $\sigma_{a\max}$ przy pomocy testu t lub testu rozstępu Duncana.

Stwierdzenie nieistotnych różnic między położeniami porównywanych prostych regresji oznaczało brak istotności wpływu określonego parametru obciążenia na trwałość zmęzeniową.

Stosowanie testu t jak i testu Duncana wymaga spełnienia warunku jednorodności wariancji oszacowania. O jednorodności względnie niejednorodności wariancji wnioskowano na podstawie testu istotności F — dla wariancji oraz testu χ^2 — dla trzech wariancji [8]. Jeżeli w wyniku testowania stwierdzono, że wariancje są niejednorodne (miało to miejsce tylko w jednym przypadku porównywania dwu prostych), istotność różnic między nachyleniami prostych i ich średnimi generalnymi, oceniono korzystając z odpowiednio opracowanego dla tego przypadku testu t — Studenta [9].

Szczegółowe wyniki badań oraz przebieg obliczeń statystycznych podano w pracy [4].

3. Analiza wyników badań

Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, że stosowanie w badaniach trzystopniowych przebiegów naprężenia o wartościach naprężeń stopniowo rosnących lub malejących, nie powoduje istotnych zmian trwałości zmęzeniowej duralu PA6N w całym, przyjętym w badaniach zakresie naprężeń maksymalnych w przebiegu: $\sigma_{a\max} = 1,36 \times 1,6 Z_{go}$. Wpływ sekwencji naprężeń jest nieistotny niezależnie od tego, który z trzech stopni naprężenia: $\sigma_{a\max}$, $\sigma_{a\text{śr}}$, czy $\sigma_{a\min}$ rozpoczyna przebieg oraz niezależnie od przyjętej liczby cykli w bloku (rys. 5). Sugeruje to, że w przypadku duralu sposób modelowania programu naprężeń z punktu widzenia kolejności ich następowania może być dowolny.

Trwałość mosiądzu natomiast okazała się być zależną od rodzaju sekwencji, ale tylko w przypadku przebiegów rozpoczynających się od najniższego stopnia naprężenia $\sigma_{a\min}$ i o dużej objętości bloku, dającej średnio trzykrotną powtarzalność bloku do złomu. Trwałość zmęzeniowa mosiądzu wyznaczona przy przebiegu naprężeń o sekwencji rosnącej jest wówczas większa średnio o 50% od trwałości wyznaczonej przy sekwencji malejącej w całym, przyjętym w badaniach, zakresie naprężeń maksymalnych w przebiegu: $\sigma_{a\max} = 1,31 - 1,53 Z_{go}$. Wynika stąd, że stosowanie w badaniach mosiądzu przebiegu o rosnącej sekwencji naprężeń, dużej objętości bloku i rozpoczynających się od najniższego stopnia naprężenia, może spowodować umocnienie mosiądzu objawiające się wzrostem trwałości zmęzeniowej.

Wobec powyższego można powiedzieć, że obydwa badane materiały w tych samych warunkach obciążenia charakteryzują się różną wrażliwością na zmianę sekwencji naprężeń. Mała wrażliwość duralu (mimo odpowiedniego doboru liczby cykli i stopni naprężenia w bloku programu, sprzyjających — według danych literaturowych — wystąpieniu wpływu sekwencji) nasuwa wniosek, że czynnikiem decydującym o pojawieniu się wpływu sekwencji jest nie tylko (jak sądzą autorzy pracy [10]) mała powtarzalność bloku przebiegu naprężenia do złomu, ale również rodzaj materiału. Potwierdzeniem tego wniosku mogą być wyniki badań, przedstawione w pracy [11].

Fakt stwierdzenia wpływu sekwencji na trwałość mosiądzu tylko w przypadku przebiegów rozpoczynających się od najniższego stopnia naprężenia, świadczy o zależności tego wpływu od kolejnego czynnika — stopnia naprężenia rozpoczynającego przebieg. Według literatury, trwałość zmęczeniowa osiąga najwyższe wartości w przypadku przebiegów o rosnącej sekwencji naprężeń, natomiast w przypadku sekwencji malejącej — najniższe (cyt. za [12]). Odwrotny charakter wpływu sekwencji stwierdzono na przykład w pracy [13]. Można więc przypuszczać, że różnice we wnioskach wynikających z tego typu badań są spowodowane różnym doбором pozostałych parametrów przebiegów, takich jak np. stopień naprężenia rozpoczynający przebieg.

Porównując parametry prostych regresji — wyznaczonych dla stopu PA6N przy przebiegach rozpoczynających się od różnych stopni naprężenia — stwierdzono, że trwałość przy przebiegach SR, rozpoczynających się od najniższego stopnia naprężenia, jest o 51% większa od trwałości przy przebiegach, w których $\sigma_{ap} = \sigma_{a,sr}$, $\sigma_{a,max}$ w całym badanym zakresie wartości naprężenia $\sigma_{a,max}$. W przypadku przebiegu SM, rozpoczynając realizację przebiegów od różnych stopni naprężenia otrzymuje się istotnie różne trwałości duralu. Różnice trwałości są zależne od wartości naprężenia $\sigma_{a,max}$. Dla najniższej wartości $\sigma_{a,max} = 1,36 Z_{g0}$ trwałość zmęczeniowa — przy przebiegu rozpoczynającym się od najniższego stopnia naprężenia — jest maksymalnie o 128% większa od trwałości wyznaczonej przy przebiegu, które rozpoczyna naprężenie $\sigma_{a,max}$. Należy przy tym zaznaczyć, że uzyskane bezwzględne różnice w trwałościach są w przybliżeniu równe sumie liczb cykli dwóch pierwszych stopni naprężeń w przebiegu; w którym $\sigma_{ap} = \sigma_{a,min}$. Można więc sądzić, że w żadnym ze zrealizowanych przypadków przebiegów naprężenia nie wystąpił efekt umocnienia duralu.

Zależność trwałości zmęczeniowej mosiądzu MO58 od wartości naprężenia rozpoczynającego przebieg istnieje tylko w przypadku realizacji przebiegów SR. Wpływ naprężenia początkowego jest tym większy, im niższa jest wartość maksymalnego naprężenia w przebiegu. Trwałość przy przebiegach, w których naprężenie początkowe $\sigma_{ap} = \sigma_{a,min}$, $\sigma_{a,sr}$ jest maksymalnie o 235% większa od trwałości przy przebiegach, w których $\sigma_{ap} = \sigma_{a,max}$ dla $\sigma_{a,max} = 1,31 Z_{g0}$. Tak duża różnica trwałości świadczyć może o wystąpieniu silnego efektu umocnienia mosiądzu.

Analizując parametry prostych wyznaczonych przy różnych objętościach bloku przebiegu (rys. 5) stwierdzono, że trwałość stopu PA6N wyznaczona przy przebiegach naprężenia, w których liczba cykli w bloku jest stała (niezależnie od wartości $\sigma_{a,max}$) nie różni się istotnie od trwałości wyznaczonych w przebiegach, w których liczba cykli w bloku zapewniała zbliżoną liczbę jego powtórzeń do złomu dla każdej wartości naprężenia $\sigma_{a,max}$. Wpływ liczby cykli w bloku na trwałość duralu jest nieistotny niezależnie od sekwencji naprężeń w przebiegu.

Zastosowanie powyższych sposobów przyjęcia liczby cykli w bloku przebiegu do określenia położenia krzywych trwałości zmęczeniowej mosiądzu MO58 ma istotny wpływ na położenie tych krzywych. W przypadku przebiegów zarówno SR jak i SM, 8-krotny wzrost liczby cykli w bloku powoduje wzrost trwałości mosiądzu o 112% (rys. 1). Oznacza to, że w zakresie małej liczby bloków realizowanych do złomu, trwałość zmęczeniowa mosiądzu wzrasta. Wynika stąd również wniosek, że krzywe trwałości zmęczeniowej przy programowanych przebiegach naprężenia powinny być wyznaczone w taki sposób, aby dla różnych wartości naprężenia σ_{nmax} , liczba powtórzeń bloku do złomu była zbliżona.

Powyższe wyniki badań sugerują, że początkowe stopnie naprężenia w przebiegu mogą — w zależności od czasu ich trwania i kolejności ich następowania — różnie oddziaływać na trwałość zmęczeniową. Ich wpływ zależy również od rodzaju materiału, tzn. od jego zdolności do treningu. Potwierdzeniem tego wniosku są wyniki badań Redkoveca [14], który twierdził, że te same początkowe stopnie naprężenia mogą — w zależności od czasu ich trwania — powodować wzrost lub zmniejszenie trwałości zmęczeniowej, albo nie mieć na nią wpływu. Podobne rezultaty badań wpływu liczby cykli w bloku przebiegu naprężenia na trwałość zmęczeniową podawane są w literaturze. Na przykład autorzy pracy [15] stwierdzili, że wpływ ten jest istotny, inni badacze [11, 14] — że niewielki, natomiast w badaniach przedstawionych w pracy [16] nie stwierdzono go wcale. Można więc przyposzczać, że (zgodnie z sugestią autora pracy [1]) dla każdego materiału istnieje pewna charakterystyczna objętość bloku, zależna od pozostałych parametrów przebiegu naprężenia, przy której uzyskuje się maksymalne umocnienie materiału, objawiające się maksymalnym wzrostem trwałości zmęczeniowej.

Uzyskane wyniki sugerują, że wpływ parametrów programowanego przebiegu naprężenia na trwałość zmęczeniową zależy istotnie od własności materiału; od jego zdolności do umacniania się w procesie zmęczenia. Dural PA6N, należący do materiałów cyklicznie osłabiających się w procesie zmęczenia, wykazuje małą wrażliwość na zmiany parametrów przebiegu. Oddziaływanie parametrów przebiegu naprężenia na trwałość zmęczeniową mosiądzu MO58 wydaje się być związane z dużą skłonnością tego materiału do umacniania się w procesie zmęczenia i możliwością wystąpienia zjawiska treningu w przypadku niektórych, charakterystycznych wariantów przebiegów.

4. Wnioski

1. Parametry programowanego przebiegu naprężenia, takie jak: sekwencja naprężeń, liczba cykli w bloku i pierwszy stopień naprężenia, mogą mieć istotny wpływ na trwałość zmęczeniową materiałów, wyznaczoną w badaniach programowanych. Wpływ każdego z tych parametrów (z osobna) na trwałość zależy od doboru dwóch pozostałych parametrów, a także od wartości naprężeń występujących w przebiegu i rodzaju materiału.

2. Stosowanie w badaniach trzystopniowych przebiegów naprężenia o rosnącej (SR) i malejącej (SM) sekwencji naprężeń, nie powoduje istotnych zmian trwałości zmęczeniowej duralu PA6N niezależnie od tego, który z trzech stopni naprężenia rozpoczyna przebieg, oraz niezależnie od liczby cykli w bloku i wartości naprężeń w przebiegu. Rozpoczęcie realizacji przebiegu od różnych stopni naprężenia może powodować istotne zmiany

trwałości duralu, zależnie od sekwencji naprężeń w przebiegu. Wpływ liczby cykli w bloku na trwałość duralu jest nieistotny, niezależnie od doboru pozostałych parametrów przebiegu.

3. Istnieje zależność między trzema parametrami przebiegu: sekwencją naprężeń, liczbą cykli w bloku i pierwszym stopniem naprężenia w ich oddziaływaniu na trwałość zmęczeniową mosiądzu MO58. Wpływ tych parametrów na trwałość jest największy w przypadku przebiegów SR, rozpoczynających się od najniższego stopnia naprężenia przy dużej liczbie cykli w bloku; tym większy, im niższa jest wartość naprężenia maksymalnego w przebiegu.

Literatura cytowana w tekście

1. J. SZALA, *Badania i obliczenia zmęczeniowe elementów maszyny w warunkach obciążeń losowych i programowanych*, Prace IPPT PAN, Warszawa, 6 (1979) 39 - 61.
2. G. H. JACOBY, *Comparison of fatigue lives under conventional program loading and digital random loading*, ASTH, STP, 462 (1960) 184 - 202.
3. E. C. NAUMANN, *Fatigue under random loading and programmed loads*, Langley Research Center, NASA, Langley Station, Hampton, Va., October (1964) 1 - 25.
4. B. KUŹNICKA, *Wytrzymałość zmęczeniowa mosiądzu MO58 i duralu PA6N przy programowanych przebiegach naprężenia*, Pr. Nauk. Inst. Mater. PWr., Raport Serii PRE, 22 (1980) 7 - 20.
5. J. W. SZPIL, *Wpływ powłok z tworzyw sztucznych na żywotność mosiądzu M63*, Rozprawa doktorska, Inst. Mater. PWr., Wrocław (1972).
6. P. GAŹDZIK, *Wpływ częstotliwości zmian naprężeń i powłok z tworzyw sztucznych na wytrzymałość zmęczeniową duralu PA6*, Rozprawa doktorska, Inst. Mater. PWr., Wrocław (1976).
7. E. GASSNER, *Programnye ekspluatacionnye ustalostnye ispytaniya primenitelno k samoletnym konstrukcijam*, Sb. Ustalost'samoletnych konstrukcij, Oborongiz (1961) 207 - 238.
8. W. VOLK, *Statystyka stosowana dla inżynierów*, WNT, Warszawa, (1973).
9. N. ОКТАВА, *Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalnictwa*, PWN, Warszawa, (1967).
10. M. KAWAMOTO, H. ISHIKAWA, T. SHIBATA, *The effect of stress sequence on the fatigue strength under program loading*, Mem. Fac. Eng. Kyoto, 35 (1973) 28 - 36.
11. M. KAWAMOTO, Y. IBUKI i inni, *The effects of blok size and cycle ratio of peak load on the fatigue strength under program loading*, The 13-th Japan Congress of Materials Research Metallic Materials, March (1970) 88 - 91.
12. T. R. G. WILLIAMS, D. H. HUGHES, *Problems involved in the development of programmed fatigue testing*, The Engineer, 28 (1960) 703 - 705.
13. Y. IBUKI, T. IWAYA, *Effects of program load including peak load on fatigue life of materials*, J. Soc Mater. Sc. Japan, vol. 25, 276 (1976) 870 - 874.
14. N. F. REDKOVEC, *K voprosu o vybore parametrov programm ustalostnych ispytanj detalej samoletnych konstrukcij*, Procnost i dolgovecnost' aviacionnych konstrukcij, Vyp. II, Kiev (1963) 174 - 184.
15. V. V. KUFAROV, A. D. POGREBNJAK, *Vlijanie parametrov programm na dolgovecnost zaropcnogo materiala pri cikliceskome nagruzenii*, Problemy procnosti, 7 (1970) 17 - 21.
16. G. D. GRINGAUZ, *O programmirovanii ustalostnych ispytanj*, Zavodskaja Laboratorija, 27, 10 (1961) 1282 - 1287.

Резюме

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОГРАММЫ НАГРУЖЕНИЯ НА УСТОЛОСТНУЮ ДАЛГОВЕЧНОСТЬ

В статье представлены результаты влияния параметров программы нагружения: последовательности чередования амплитуд напряжений, начального уровня напряжений и объема блока на долговечность сплавов РА6Н и МО58. Поведенные испытания показали, что влияние на долговечность каждого из этих параметров зависит от выбора других параметров, от интервала напряжений в программе и от испытанного материала.

S u m m a r y

THE EFFECT OF PROGRAMMED LOAD SPECTRUM PARAMETERS ON THE FATIGUE LIFE

The effect of stress sequence, initial stress level and number of cycles in a block on the fatigue life of PA6N duraluminium and MO58 brass alloys has been investigated. The effect of each of these parameters has been found to depend on the selection of the remaining parameters, the range of stresses in a spectrum and on the type of material as well.

Praca została złożona w Redakcji dnia 7 kwietnia 1981 roku