

WPLYW SEKWENCJI OBCIĄŻEŃ NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ^{*)}

JÓZEF SZALA (BYDGOSZCZ)

Wykaz oznaczeń

- N liczba cykli obciążenia sinusoidalnego o stałej amplitudzie zrealizowana do pęknięcia zmęczeniowego próbki,
 N_0 liczba przecięć przez wykres losowych zmian naprężeń $\sigma(t)$ poziomu odpowiadającego naprężeniom równym zeru,
 N_1 liczba lokalnych ekstremów wykresu losowych zmian naprężeń lub liczba cykli o stałej amplitudzie zrealizowana do pęknięcia zmęczeniowego odpowiadająca poziomowi 1 naprężeń w widmie naprężeń,
 k liczba poziomów (stopni) wartości naprężeń w widmie lub programie naprężeń lub liczba stopni przyjęta do obliczeń trwałości zmęczeniowej na podstawie hipotezy Palmgrena-Minera,
 m wykładnik potęgi w równaniu krzywej zmęczeniowej,
 n_c sumaryczna liczba cykli w widmie naprężeń lub sumaryczna liczba cykli do pęknięcia próbki w programowanych badaniach zmęczeniowych (trwałość zmęczeniowa),
 n_i liczba cykli zmian naprężeń o wartości σ_i w widmie lub programie naprężeń,
 σ_{ai} wartość amplitudy naprężeń odpowiadająca i -temu poziomowi (stopniowi) w widmie lub programie naprężeń,
 $\sigma_a(N)$ krzywa zmęczeniowa,
 $\sigma_{amax}(n_c)$ krzywa trwałości zmęczeniowej.

1. Wprowadzenie

Powszechnie stosowanymi charakterystykami do oceny własności zmęczeniowych materiałów, elementów i układów są krzywe zmęczeniowe (krzywe Wöhlera). W przypadkach losowych obciążeń eksploatacyjnych elementów maszyn charakterystyka ta jest niewystarczająca. Dokładniejszą ocenę własności zmęczeniowych w wymienionych przypadkach przeprowadzić można na podstawie znajomości krzywych trwałości zmęczeniowej wyznaczonych na drodze analitycznej lub na podstawie badań z obciążeniem odpowiadającym obciążeniom eksploatacyjnym.

Ze względu na dużą złożoność zjawisk fizycznych zachodzących w procesie zmęczenia nie ma do tej pory jednoznacznego opisu przebiegu wymienionego procesu. Brak ten wypełniono opracowaniem szeregu hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych o charakterze fenomenologicznym. Analiza przedstawiona w pracy [1] wykazała, że wybrane do

^{*)} Praca wykonana w ramach problemu węzłowego 0.5.12 pt. *Wytrzymałość i optymalizacja konstrukcji maszynowych i budowlanych* — koordynowanego przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk.

wyznaczenia trwałości hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, wykazywały różną zgodność z wynikami badań zmęczeniowych w zależności od przyjętych warunków badań. Brak uniwersalnej hipotezy sprawia, że najczęściej stosowaną do obliczeń trwałości zmęczeniowej jest liniowa hipoteza kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrena-Minera. Jedną z jej wad jest nieuwzględnienie sekwencji obciążenia (historii obciążenia). Podjęte w przedstawionej pracy badania umożliwiają ocenę istotności wymienionej wady.

Doświadczalne wyznaczanie trwałości oparte jest na badaniach zmęczeniowych z losowym, zbliżonym do eksploatacyjnego lub programowanym obciążeniem. W ostatnich latach obserwuje się duże zainteresowanie programowanymi badaniami zmęczeniowymi. Badania te prowadzi się głównie w celu wyznaczenia własności zmęczeniowych materiałów, węzłów konstrukcyjnych i elementów maszyn oraz w celu oceny eksploatacyjnej trwałości zmęczeniowej elementów i układów poddanych w warunkach eksploatacji obciążeniami zmiennymi losowo.

Związkom między losowymi i programowanymi obciążeniami z punktu widzenia trwałości zmęczeniowej poświęconych zostało szereg prac. Większość prac dotyczyła badań stopów aluminium, obciążonych zgodnie z widmami od podmuchów działających na samoloty w warunkach eksploatacji. Dane doświadczalne na ten temat podane w literaturze nie są zgodne. W pracy [2] podano, że wyznaczona w badaniach programowanych trwałość zmęczeniowa jest 6-krotnie większa niż trwałość zmęczeniowa wyznaczona przy obciążeniu losowym. Z rezultatów przedstawionych w pracy [3] wynika, że przy odpowiednim programowaniu obciążeń losowych średnia prędkość propagacji pęknięcia zmęczeniowego wyznaczona w badaniach z obciążeniem programowanym i losowym różni się nieistotnie.

Fizyczna analiza kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych wykazuje, że uszkodzenia zmęczeniowe powstałe przy obciążeniach losowych różnią się od uszkodzeń powstałych przy obciążeniach programowanych. Różnice te stwierdzono m.in. na podstawie obserwacji przełomów zmęczeniowych pod mikroskopem elektronowym. Przykład tego rodzaju badań przedstawiono w pracy [4].

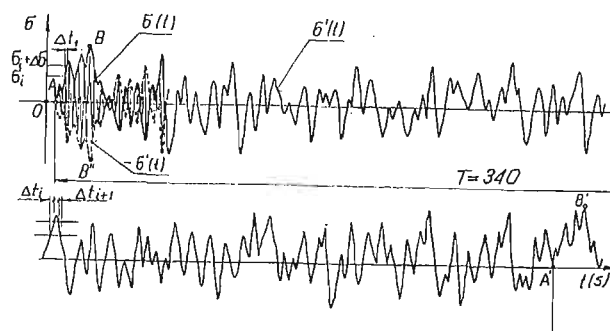
Brak większej liczby danych z badań przeprowadzonych dla różnych materiałów, przy obciążeniach zróżnicowanych pod względem rodzaju (rozciąganie, zginanie, skręcanie oraz stany złożone) i charakteru (obciążenia o charakterze losowym zróżnicowane z punktu widzenia matematycznej teorii procesów losowych) uniemożliwia sformułowanie ścisłych zaleceń dotyczących programowania obciążeń w badaniach zmęczeniowych.

Celem przedstawionej pracy jest:

- stwierdzenie różnic między trwałością zmęczeniową wyznaczoną przy obciążeniu losowym i programowanym,
- stwierdzenie wpływu ukształtowania programu obciążeń na trwałość zmęczeniową wyznaczoną w badaniach stanowiskowych,
- stwierdzenie wpływu ukształtowania programu obciążeń na trwałość zmęczeniową w zależności od wartości obciążeń w widmie,
- podanie danych liczbowych charakteryzujących przebieg krzywych trwałości zmęczeniowej i ich położenie w stosunku do krzywej zmęczeniowej,
- ocenę zgodności liniowej hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrena-Minera z wynikami badań zmęczeniowych.

2. Zmienne obciążenia

2.1. Obciążenia losowe. Zmienne naprężenia w czasie $\sigma(t)$ w przekroju próbki otrzymano w próbie obrotowego zginania obciążając koniec próbki zamocowanej wysięgowo we wrzecionie stanowiska badawczego. Podawane w pracy wartości naprężeń nominalnych w przekroju karbu wyznaczono na drodze obliczeń. Wykresy zmian naprężeń o charakterze losowym przedstawiono na rys. 1. Losowym zmianom obciążenia próbki odpowiadają zmiany naprężeń wykreślone na rys. 1 linią grubą $\sigma'(t)$, które z wykresem $-\sigma'(t)$

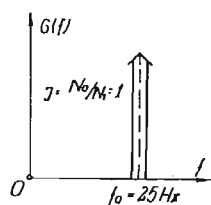


Rys. 1

stanowią odpowiednio wartości amplitud zmian naprężeń $\sigma(t)$ w przekroju obracającej się próbki. Odpowiednie wartości obwiedni powtarzają się po czasie $T = 340$ s (punkty $A-A'$, $B-B'$). Przedstawiony na rys. 1 przebieg zmian naprężeń $\sigma(t)$ można opisać zależnością

$$(1) \quad \sigma(t) = \sigma'(t) \cdot \cos 2\pi n'' t.$$

Prędkość obrotowa n'' badanych próbek wynosiła 25 s^{-1} . Z punktu widzenia przebiegu procesu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych zastosowane obciążenie pseudolosowe odpowiada zadowalająco obciążeniu losowemu o podobnych charakterystykach stochastycznych. Funkcję gęstości widmowej $G(f)$ zmian naprężeń $\sigma(t)$ przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2

Przebieg funkcji gęstości widmowej pozwala stwierdzić, że losowa zmiana naprężeń w próbce odpowiada, z punktu widzenia teorii procesów losowych, procesowi losowemu o wąskim widmie ($I = N_0/N_1 = 1$).

2.2. Obciążenia programowane. Przyjęta w omawianych badaniach próba obrotowego zginania umożliwia realizację losowych zmian amplitudy naprężeń przy zachowaniu naprężeń

średnich równych zeru. Taki przebieg zmiennych naprężeń w przekroju próbki nie wymaga stosowania metod aproksymacji losowych zmian naprężeń [5] przy opracowywaniu widm naprężeń. Unika się dzięki temu poważnych niedokładności związanych z przybliżonym wyznaczeniem zastępczych, w stosunku do losowych zmian, cykli sinusoidalnych. Wykorzystanie generatora impulsów pseudolosowych o okresie powtarzalności $T = 340$ s dało możliwość dokładnego opracowania widma i oceny maksymalnej wartości naprężenia $\sigma_{a\max}$ (punkt B, rys. 1) w czasie trwania próby zmęczeniowej. Dokładność odwzorowania rozkładu amplitud zmian naprężeń w badaniach trwałości zmęczeniowej ma zasadnicze znaczenie. Wykładniczy charakter krzywych trwałości zmęczeniowej powoduje, że małe różnice w wartościach naprężeń powodują znaczne różnice w wartościach wyznaczonej trwałości zmęczeniowej.

W celu uproszczenia opracowania statystycznego realizacji losowych zmian naprężeń $\sigma(t)$, zakres zmian naprężeń od wartości maksymalnej (punkt B) do wartości minimalnej $\sigma_{\min} = -\sigma_{\max}$ (punkt B'') podzielono na 16 przedziałów klasowych. Względna liczbę wartości amplitud naprężeń $\sigma_a(t)$ w poszczególnych przedziałach klasowych o rozpiętości $\Delta\sigma$ (rys. 1) można wyznaczyć obliczając dla poszczególnych przedziałów klasowych wartości

$$(2) \quad f_i = \frac{n_i}{n_c} = \frac{\sum \Delta t_i}{T},$$

gdzie $\sum \Delta t_i = \Delta t_1 + \dots + \Delta t_i + \Delta t_{i+1} + \dots + \Delta t_n$ oznacza sumaryczny czas «przebywania» funkcji $\sigma'(t)$ w przedziale klasowym $[\sigma_{ai}, \sigma_{ai} + \Delta\sigma]$ w czasie T , T — czas równy okresowi zmian obciążenia pseudolosowego (340 s).

Tablica 1:

Lp.	Określenie zmian naprężeń	Schemat i oznaczenie programu	Rozkład amplitud naprężeń
1	naprężenia o charakterze losowym		
2	stopniowo rosnące		
3	stopniowo malejące		
4	stopniowo rosnące i malejące		
5	o losowym następstwie stopni		

Wyniki statystycznego opracowania wykresu losowych zmian naprężeń przedstawiono w kolumnie 4 tablicy 1. Wykres rozkładu amplitud naprężeń — zwany widmem naprężeń — wykonano w układzie względnych wartości naprężeń $\sigma_{ai}/\sigma_{a\max}$ i względnych wartości kumulowanych liczb cykli $\sum n_i/n_c$. Opracowanie widma naprężeń w odniesieniu do względnych wartości naprężenia i liczby cykli na poszczególnych poziomach naprężeń, ułatwia

wyznaczenie krzywych trwałości zmęczeniowej, jako funkcji naprężenia maksymalnego w widmie od sumarycznej liczby cykli do pęknięcia zmęczeniowego.

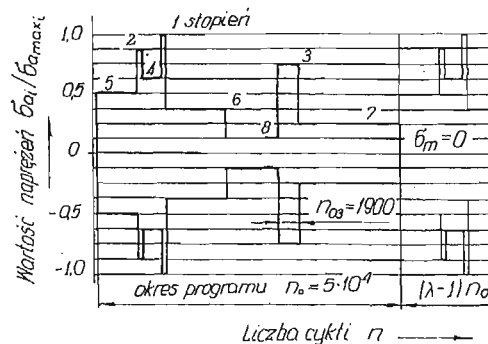
Podstawowymi parametrami charakteryzującymi widmo naprężeń zastosowane w badaniach są: naprężenie maksymalne w widmie $\sigma_{\max} = \sigma_{a\max}$ i postać geometryczna widma. Postać geometryczną widma charakteryzuje się różnymi współczynnikami omówionymi m.in. w pracach [6, 7, 8]. W przedstawionym opracowaniu scharakteryzowano postać geometryczną współczynnikiem wypełnienia widma ξ podanym w pracy [8], który oblicza się ze wzoru

$$(3) \quad \xi = \frac{1}{\sigma_{a\max}} \sum_{i=1}^k \sigma_{ai} f_i.$$

We wzorze (3) f_i oznacza względną częstość występowania naprężeń o wartości σ_{ai} , którą oblicza się z wzoru (2).

W kolumnie 3 tabeli 1 przedstawiono schematycznie postacie graficzne programów naprężeń przyjętych do badań. W programie podanym w wierszu 2 tabeli 1 naprężenia stopniowo rosną od wartości minimalnej do maksymalnej, w dalszym ciągu opracowania program ten oznaczono symbolem *SR*. W wierszu 3 tabeli 1 przedstawiono program o stopniowo malejących naprężeniach — *SM*. W szeregu pracach m.in. [2] i [6] proponuje

stopień i	1	2	3	4	5	6	7	8
napr. $\sigma_{ai}/\sigma_{a\max}$	1,00	0,875	0,750	0,625	0,5	0,375	0,250	0,125
liczba cykli n_{oi}	300	600	1900	4050	6900	10250	17500	8500



Rys. 3

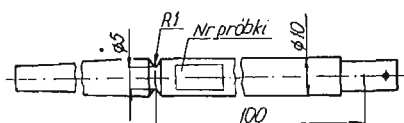
się ukształtowanie programu według schematu podanego w wierszu 4 tabeli 1. W programie *SRM* badania rozpoczyna się od pewnej wartości średniej naprężeń zwiększając stopniowo wartości naprężeń do maksymalnej, następnie stopniowo obniżając do minimalnej wartości itd. W ostatnim programie (wiersz 5 tabeli 1) przyjęto losowe następstwo stopni wartości naprężeń — *SL*. Na rys. 3 podano dla przykładu wykres oraz dane liczbowe programu o losowym następstwie stopni, który opracowany został dla względnych wartości naprężeń oraz okresu programu o liczbie cykli $n_0 = 5 \cdot 10^4$.

W przeprowadzonych badaniach liczby cykli w okresach programów były zmienne w zależności od poziomu naprężeń. Liczbę cykli w okresie dobierano z takim wyliczeniem, aby liczba okresów zrealizowanych do pęknięcia zmęczeniowego wynosiła co najmniej 10.

Wszystkie zastosowane w badaniach programy bez względu na wartości naprężeń, liczby cykli w okresie i ukształtowanie programu miały ten sam rozkład wartości amplitud zgodny z widmem naprężeń podanym w kolumnie 4 tablicy 1.

3. Opis badań

3.1. Próbkki. Badania zmęczeniowe przeprowadzono na okrągłych próbkach z karbem przedstawionych na rys. 4. Próbkki wykonano ze stali 45. Doraźna wytrzymałość wyznaczona w próbie rozrywania według PN-71/H-04310 wynosiła średnio $R_m = 77,6 \text{ daN/mm}^2$, a umowna granica plastyczności $R_{e02} = 39 \text{ daN/mm}^2$.



Rys. 4

Karb wykonano dokładnym toczeniem zachowując chropowatość powierzchni na dnie karbu o $R_a = 1,25 \mu\text{m}$.

Do całości badań zmęczeniowych wykonano 400 próbek pobieranych do prób w sposób losowy, próbki oznaczono porządkowymi numerami zgodnie z kolejnością wykonywanych prób.

3.2. Stanowisko badawcze. Do badań zaprojektowano i wykonano w Zakładzie Podstaw Konstrukcji Maszyn Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy stanowisko badawcze przedstawione na rys. 5.

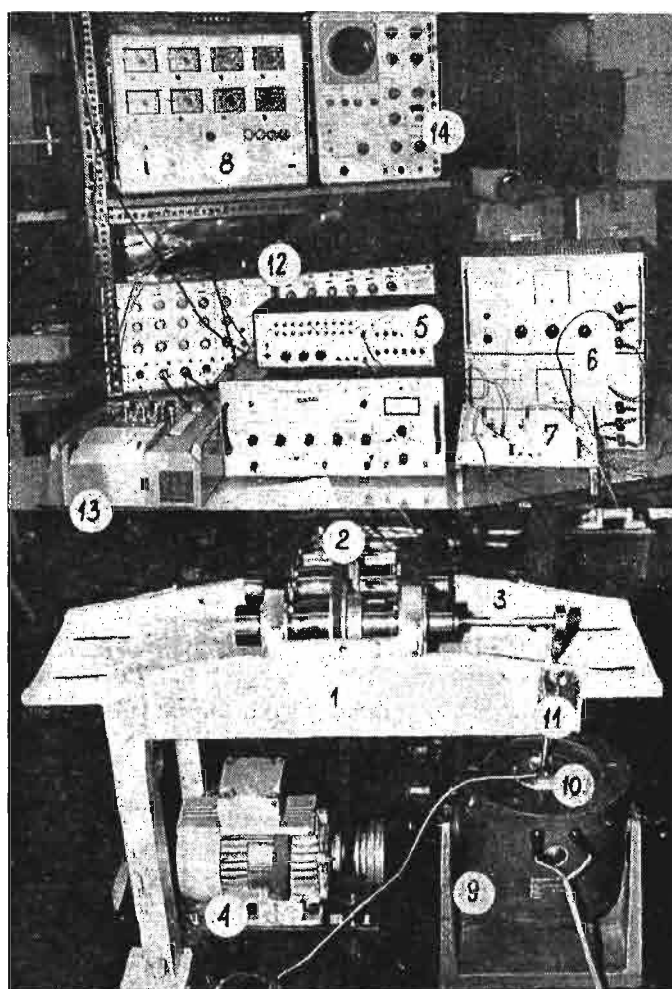
Stanowisko badawcze składa się z trzech części:

- mechanicznej,
- układu obciążającego,
- układu pomiarowego.

Część mechaniczną stanowi urządzenie składające się z korpusu 1, w którym ułożyskowane są dwa wrzeciona 2. Każde wrzeciono posiada na obu końcach gniazda stożkowe do mocowania części chwytowej badanych próbek 3. Wrzeciona napędzane są silnikiem elektrycznym 4 za pośrednictwem pasa klinowego.

Układ obciążający składa się z generatora impulsów pseudolosowych 5, stabilizowanych zasilaczy 6, układu sterowania wzбудnikiem 7, urządzenia do programowania obciążeń sinusoidalnych 8, wzbudnika elektromagnetycznego 9.

Układ pomiarowy obciążeń działa na zasadzie wykorzystania tensometrów oporowych. Tensometr oporowy czynny naklejono na płytce 10 łączącej ciągnio 11 z rdzeniem wzbudnika. Układ pomiarowy składa się z mostków tensometrycznych 12, rejestratora szybko-piszącego 13 oraz oscyloskopu 14.



Rys. 5

Naprężenia zmienne w przekroju próbki 3 otrzymuje się w wyniku obciążenia końca próbki wysięgowej przez wzbudnik elektromagnetyczny 12 oraz przez obrót próbki zamocowanej we wrzecionie 2. Zmiana losowa lub programowana naprężeń w przekroju próbki wynika z odpowiedniej zmiany obciążenia próbki. Pseudolosową zmianę obciążenia realizuje automatycznie układ: generator impulsów pseudolosowych 5, dwa stabilizowane zasilacze 6, układ sterowania wzbudnikiem 7 oraz wzbudnik elektromagnetyczny 11. Programowane obciążenie realizowane jest także automatycznie przez układ, w którym generator impulsów pseudolosowych zastąpiony został urządzeniem do programowania obciążeń sinusoidalnych. Zmianę wartości obciążenia losowego i programowanego otrzymuje się przez ustalenie odpowiedniej wartości natężenia prądu potencjometrem urządzenia sterowania wzbudnikiem 7. Liczbę cykli zmian naprężeń w przekroju próbki, która równa jest liczbie obrotów wrzeciona wskazuje licznik cykli, natomiast częstotliwość zmian — wskazuje wskaźnik chwilowej prędkości obrotowej. Licznik cykli oraz

wskaźnik chwilowej prędkości obrotowej umieszczone są w urządzeniu do programowania obciążeń sinusoidalnych 8.

Przebieg obciążeń końca próbki w czasie rejestrowany jest na taśmie rejestratora szybkopiszącego 13. Do bieżącej kontroli przebiegu zmian obciążeń oraz wykrywania zakłóceń służył oscyloskop 14.

Budowę i zasadę działania generatora impulsów pseudolosowych oraz charakterystyki statystyczne generowanych przebiegów omówiono w pracy [9].

3.3. Przebieg badań. Określenie własności zmęczeniowych badanych próbek oraz ocena ilościowa zależności między trwałością przy obciążeniu jednostopniowym, losowym i programowanym wymaga wyznaczenia krzywej zmęczeniowej w zakresie ograniczonej i nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej.

Badania w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej przeprowadzono na pięciu poziomach wartości nominalnych naprężeń w próbce badając na każdym z poziomów średnio 7 próbek.

Nieograniczoną wytrzymałość zmęczeniową wyznaczono metodą schodkową na podstawie badań 27 próbek, jako bazę próby zmęczeniowej przyjęto $5 \cdot 10^6$ cykli.

Różnice między trwałością zmęczeniową wyznaczoną przy obciążeniu losowym i programowanym, wpływ ukształtowania programów obciążenia na trwałość zmęczeniową oraz stwierdzenie zależności wymienionych różnic i wpływu od wartości obciążeń w widmie, dokonane zostało na podstawie porównań krzywych trwałości zmęczeniowej wyznaczonych przy obciążeniu losowym i programowanym. Do badań przyjęto obciążenia losowe i programowane omówione w punkcie 2. Poszczególne krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczono na podstawie badań przeprowadzonych średnio na 24 próbkach na 5 poziomach wartości maksymalnych naprężeń w programie: 36,5, 32,5, 28,5, 24,5 i 20,5 daN/mm². W badaniach z obciążeniem losowym wykonano ponadto badania na poziomie wartości naprężenia maksymalnego w programie 40,5 daN/mm², pomijając ze względów technicznych (czas próby — kilka miesięcy) badania na poziomie 20,5 daN/mm².

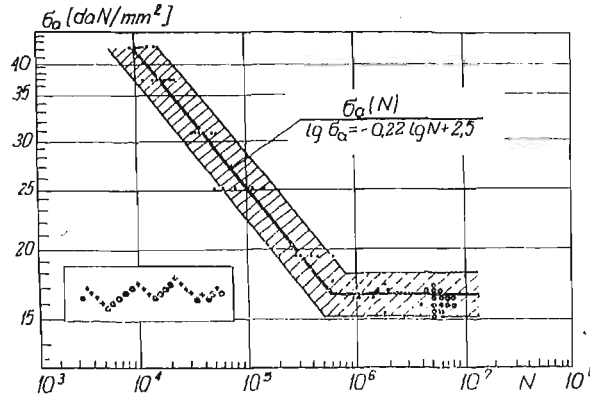
4. Wyniki badań zmęczeniowych i ich opracowanie

4.1. Wyznaczenie krzywej zmęczeniowej. Wyniki badań zmęczeniowych przeprowadzonych w celu wyznaczenia krzywej zmęczeniowej podano na rys. 6. Opracowanie wyników badań w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej polegało na wyznaczeniu prostej regresji metodą najmniejszych kwadratów oraz przedziałów ufności dla pojedynczych wyników na poziomie ufności 0,95. Wartość średnią wykreślono ciągłą grubą linią, natomiast obszar zakreślony odpowiada wyznaczonemu przedziałowi ufności. Prostą regresji w układzie logarytmicznym opisać można równaniem

$$(4) \quad \log \sigma_a = -0,2192 \log N + 2,4965.$$

W dolnej części rys. 6 przedstawiono w sposób schematyczny przebieg prób zmęczeniowych według metody schodkowej, znakiem (0) oznaczono próbki, które nie uległy pęknięciu zmęczeniowemu po zrealizowaniu bazowej liczby $5 \cdot 10^6$, natomiast znakiem (+) oznaczono próbki, które uległy pęknięciu przy liczbie cykli mniejszej od liczby bazowej.

Na wykresie krzywej zmęczeniowej punkty zaczerpnięte odpowiadają próbkom, które uległy pęknięciu, natomiast punkty nie zaczerpnięte odpowiadają próbkom, które nie uległy pęknięciu zmęczeniowemu. Wartość średnią nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej

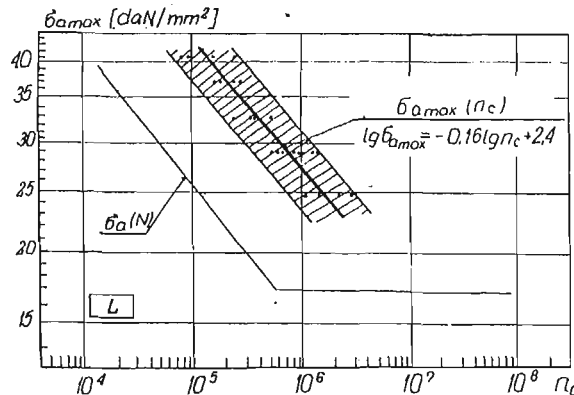


Rys. 6

i odchylenie standardowe wyznaczono na podstawie wzorów Dixona i Mooda. Wartości te wynoszą odpowiednio:

$$\bar{\sigma}_{\theta 0} = 16,56 \text{ daN/mm}^2, \quad s = 0,51 \text{ daN/mm}^2.$$

4.2. Wyznaczenie krzywych trwałości zmęczeniowej. Wyniki badań zmęczeniowych, których celem było wyznaczenie krzywych trwałości zmęczeniowej podano na wykresach w układzie logarytmicznym (rys. 7—11). Dla orientacji na wykresach podano także położenie

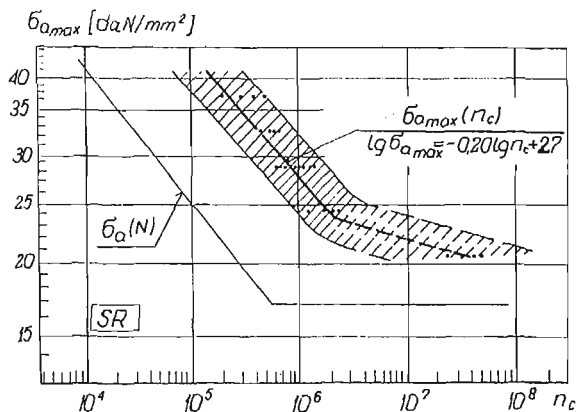


Rys. 7

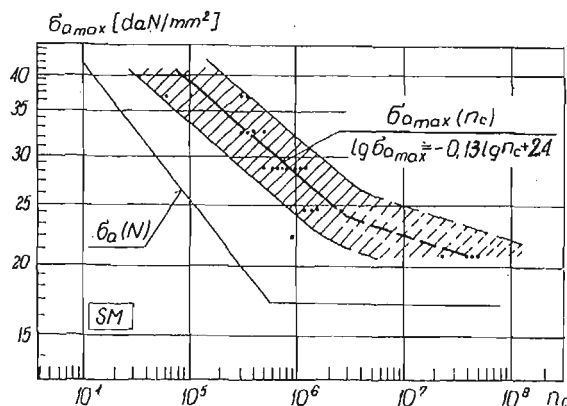
krzywej zmęczeniowej. Opracowanie wyników badań polegało na wyznaczeniu prostych regresji metodą najmniejszych kwadratów. Poszczególne rysunki zawierają wykresy wartości średniej wraz z zakreskowanym obszarem, który odpowiada przedziałowi ufności dla pojedynczych wyników na poziomie ufności 0,95.

Na rys. 7 przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych przeprowadzonych przy obciążeniu o charakterze losowym (L).

Wyniki programowanych badań zmęczeniowych dla przyjętych do badań programów naprężeń przedstawiono na rys. 8-11. Na rys. 8 przedstawiono wyniki badań z programem naprężeń stopniowo rosnących (SR), na rys. 9 — stopniowo malejących (SM),

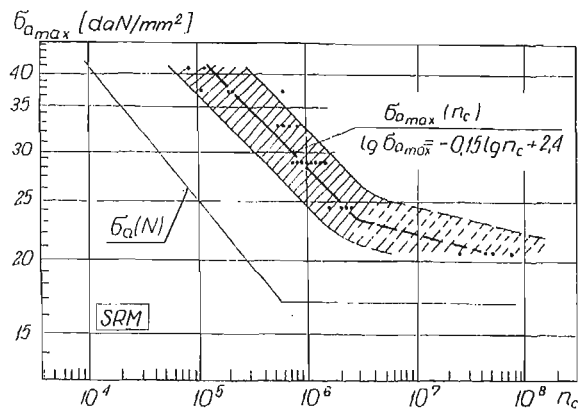


Rys. 8

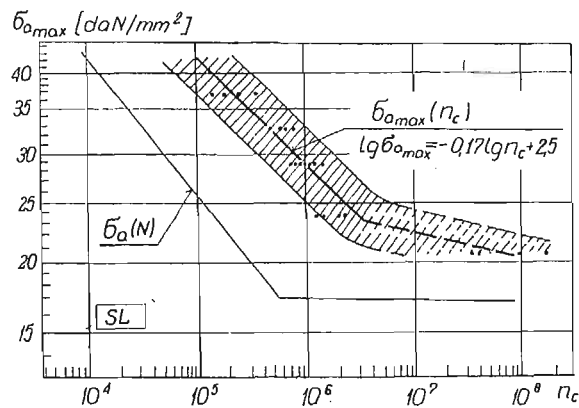


Rys. 9

na rys. 10 — stopniowo rosnących i malejących (SRM) oraz na rys. 11 przedstawiono wyniki badań z programem o losowym następstwie stopni (SL). Do analizy regresji przyjęto wyniki badań odpowiadające naprężeniom maksymalnym w programie $\sigma_{a,max}$ leżącym na poziomach 36,5, 32,5, 28,5 i 24,5 daN/mm^2 . Przebieg krzywych w zakresie naprężeń maksymalnych w programie od 20,5 do 24,5 daN/mm^2 zaznaczony na wykresach liniami przerywanymi jest przybliżony. W zakresie tym wykresy trwałości zmęczeniowej znacznie odbiegają od wyznaczonych prostych regresji zbliżając się asymptotycznie do linii odpowiadającej nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej badanych próbek. Dokładne wyznaczenie przebiegu wykresów dla wartości naprężeń maksymalnych w programie bliskich wartości nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej wymagałoby zrealizowania specjalnego programu badań i ze względu na olbrzymią pracochłonność jest niecelowe. Równania prostych regresji odpowiadających krzywym trwałości zmęczeniowej dla poszcze-



Rys. 10



Rys. 11

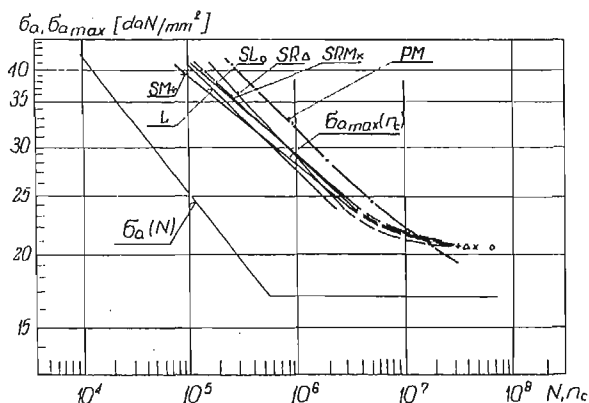
gólnych rodzajów obciążeń podano w tablicy 2. Wartość średnia współczynników kierunkowych prostych regresji podanych w tablicy 2 odpowiadających krzywym trwałości zmęczeniowej wynosi 0,1645, natomiast wartość średnia wyrazu wolnego 2,4468.

Tablica 2

Lp.	Oznaczenie obciążenia	Równanie prostej regresji
1	2	3
1	<i>L</i>	$\log \sigma_{a \max} = -0,1609 \log n_c + 2,4076$
2	<i>SR</i>	$\log \sigma_{a \max} = -0,2016 \log n_c + 2,6601$
3	<i>SM</i>	$\log \sigma_{a \max} = -0,1306 \log n_c + 2,3402$
4	<i>SRM</i>	$\log \sigma_{a \max} = -0,1522 \log n_c + 2,3729$
5	<i>SL</i>	$\log \sigma_{a \max} = -0,1665 \log n_c + 2,4525$

5. Analiza wyników

Krzywe trwałości zmęczeniowej wyznaczone w badaniach zmęczeniowych przy obciążeniu losowym i programowanym przedstawione na rysunkach 7—11 posiadają podobne przebiegi. Porównanie wartości współczynników kierunkowych i wyrazów wolnych w równaniach prostych regresji podanych w tablicy 2 odpowiadających poszczególnym krzywym trwałości zmęczeniowej wykazuje małe różnice. Na rys. 12 przedstawiono wzajemne położenie prostych regresji oraz średnich wartości trwałości zmęczeniowej wyznaczonej w programowanych badaniach na poziomie wartości maksymalnego naprężenia w widmie równej $20,5 \text{ daN/mm}^2$.



Rys. 12

Ocenę istotności wymienionych różnic przeprowadzono na podstawie analizy statystycznej uzyskanych rezultatów, która obejmowała sprawdzenie hipotezy o równości średnich wartości trwałości zmęczeniowej (test analizy wariancji dla wielu średnich) oraz sprawdzenie hipotezy o równoległości prostych regresji odpowiadających badaniom przy obciążeniu losowym i programowanym (test równoległości). Badanie równości wartości średnich poszczególnych krzywych dotyczyło wyników na wszystkich poziomach naprężenia maksymalnego w widmie łącznie oraz badania równości wartości średnich na wybranych poziomach o wartościach $28,5$ i $20,5 \text{ daN/mm}^2$.

Poziom o wartości $28,5 \text{ daN/mm}^2$ zbliżony jest do środka zakresu naprężeń przyjętego do badań. Na poziomie tym celem uściślenia analizy wykonano badania na 8 próbkach dla każdej krzywej trwałości. Wyniki badań trwałości zmęczeniowej na poziomie $20,5 \text{ daN/mm}^2$ wyraźnie odbiegają od prostych regresji, stąd konieczność przeprowadzenia oddzielnej analizy statystycznej wyników na tym poziomie.

Przeprowadzona statystyczna analiza wykazała, że na poziomie ufności równym $0,95$ nie ma podstaw do odrzucenia hipotez: o równości wartości średnich trwałości zmęczeniowej poszczególnych krzywych trwałości dla wyników na wszystkich poziomach łącznie, o równości wartości średnich na poziomach wartości maksymalnych naprężeń w widmach równych $28,5$ i $20,5 \text{ daN/mm}^2$ oraz hipotezy o równoległości wyznaczonych prostych regresji odpowiadających poszczególnym krzywym trwałości.

Z przeprowadzonej analizy statystycznej wynika, że istnieje możliwość zastąpienia badań z obciążeniem losowym przez programowane badania zmęczeniowe, ponieważ różnice w wyznaczonej trwałości zmęczeniowej są nieistotne. Przytoczone stwierdzenie dotyczy całego zakresu naprężeń maksymalnych w widmie przyjętego do badań.

Porównanie krzywych trwałości zmęczeniowej wyznaczonych z zastosowaniem różnie ukształtowanych programów świadczy o nieistotnym wpływie ukształtowania programu na trwałość zmęczeniową. Krańcowe położenia zajmują krzywe wyznaczone z zastosowaniem programów *SR* (stopniowo rosnących naprężeń) i *SM* (stopniowo malejących naprężeń). Maksymalne różnice między wymienionymi krzywymi zachodzą przy wyższych wartościach naprężeń w programie.

Pewnych informacji dostarcza analiza wartości średnich krzywych trwałości zmęczeniowej. W górnym zakresie wartości naprężeń maksymalnych w programie trwałość zmęczeniowa wyznaczona przy obciążeniu losowym jest około: 20, 23 i 80% mniejsza oraz 20% większa od trwałości wyznaczonej w programowanych badaniach zmęczeniowych z zastosowaniem programów (w kolejności odpowiadającej wymienionym wartościom): *SRM*, *SL*, *SR* i *SM*. Dla niższych wartości naprężeń maksymalnych w programie wymienione różnice trwałości zdecydowanie maleją.

Wzajemne położenie prostych regresji przedstawione na rys. 12 oraz wartości współczynników kierunkowych i wartości wyrazów wolnych w równaniach prostych regresji podanych w tablicy 2 świadczą o tym, że w całym zakresie wartości naprężeń maksymalnych w widmie (programie) przyjętym do badań, najbardziej zbliżony przebieg do krzywej wyznaczonej przy obciążeniu losowym (*L*) mają krzywe wyznaczone przy programowanym obciążeniu o losowym następstwie stopni (*SL*) oraz stopniowo rosnącym i malejącym (*SRM*).

Brak podstaw do odrzucenia hipotezy o równoległości prostych regresji świadczy o tym, że współczynnik kierunkowy prostych regresji w sposób nieistotny zależy od sekwencji obciążeń, a wartość współczynnika kierunkowego zależna jest podobnie jak dla krzywej zmęczeniowej od cech materiałowych i geometrycznych próbki. Fakt ten umożliwia wyznaczenie liczbowych zależności między krzywą zmęczeniową a krzywą trwałości zmęczeniowej dla ściśle określonego widma (określonego np. współczynnikiem wypełnienia ξ).

Dla przyjętych w przedstawionym opracowaniu warunków badań stosunek wartości współczynnika kierunkowego prostej regresji odpowiadającej krzywej zmęczeniowej do wartości średniej współczynników kierunkowych prostych regresji odpowiadających krzywom trwałości zmęczeniowej wynosi około 1,34, natomiast odpowiedni stosunek wyrazów wolnych wynosi około 1,01. Znajomość podanych zależności umożliwia przewidywanie przebiegu krzywej trwałości zmęczeniowej dla określonego widma naprężeń w przypadku, gdy znana jest krzywa zmęczeniowa.

Podane w punkcie 4 rezultaty badań zmęczeniowych umożliwiają przeprowadzenie doświadczalnej weryfikacji liniowej hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren-Minera

$$(5) \quad \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1.$$

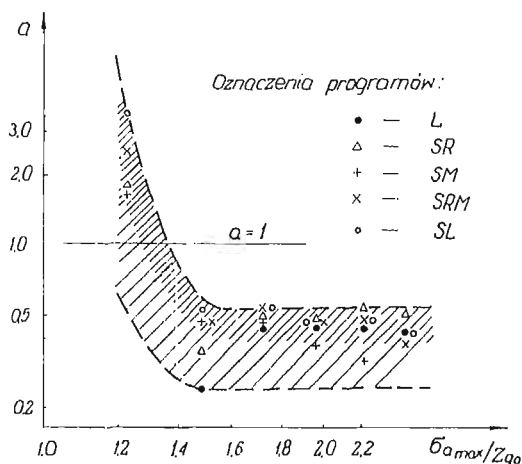
Po prostych przekształceniach wzoru (5) otrzymuje się wzór na trwałość zmęczeniową

$$(6) \quad n_{c0} = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^k (\sigma_{ai}/\sigma_{a\max})^m f_i}.$$

Z założeń przyjętych w liniowej hipotezie kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych wynika, że w obliczeniach uwzględniane są jedynie poziomy naprężenia o wartościach większych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej $\sigma_{ai} > Z_{g0}$. Wykładnik potęgi m obliczony na podstawie wzoru (4) posiada wartość 4,55. Krzywa trwałości zmęczeniowej obliczona na podstawie wzoru (6) przedstawiona została na rysunku 12 i oznaczona literami PM. Jak wynika z rys. 12 trwałość zmęczeniowa obliczona n_{c0} różni się od trwałości zmęczeniowej wyznaczonej w badaniach zmęczeniowych n_{cex} . Za miarę niezgodności wyników obliczeń i badań przyjęto współczynnik wyrażony wzorem

$$(7) \quad a = \frac{n_{cex}}{n_{c0}}.$$

Całkowita zgodność obliczeń z wynikami badań zachodzi w przypadku, gdy $a = 1$, dla $a < 1$ obliczona wartość trwałości zmęczeniowej jest większa od doświadczalnej, natomiast gdy $a > 1$ obliczona wartość trwałości zmęczeniowej jest mniejsza od doświadczalnej. Wykres wartości współczynnika a w funkcji względnych wartości naprężenia



Rys. 13

maksymalnego w widmie obliczonego w stosunku do wartości nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej przedstawiono na rys. 13. Wykres wykonano w układzie współrzędnych logarytmicznych. Odpowiednie punkty wykresu odpowiadają wartościom współczynnika a obliczonego dla obciążenia losowego i poszczególnych programów obciążeń, na poziomach naprężeń względnych odpowiadających poziomom naprężeń maksymalnych w programach przyjętych do badań zmęczeniowych. Przebieg zmian zależności współczynnika a od względnych wartości naprężenia maksymalnego w widmie przedstawiono na rys. 13 za pomocą zakreskowanego obszaru, który asymptotycznie zbliża się do rzędnej $\sigma_{a\max}/Z_{g0} = 1$. Większość wyników obliczeń leży w obszarze gęsto zakreskowanym.

Z omawianego wykresu wynika, że istnieje zdecydowana zależność wartości współczynnika a od wzrostu naprężenia maksymalnego w widmie naprężeń dla względnych wartości naprężeń leżących w zakresie 1,0—1,5. Zależność ta jest nieistotna dla wartości większych od 1,5. Zadowalającą zgodność wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej według hipotezy liniowej kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych z wynikami badań zmęczeniowych otrzymuje się dla względnych wartości naprężenia maksymalnego w widmie wynoszących około 1,3.

Wyznaczona na podstawie wykresu (rys. 13) wartość współczynnika a umożliwia korektę obliczeń. Wzór (6) przyjmuje wówczas postać

$$(8) \quad n_{co} = \frac{aN_t}{\sum_{i=1}^k (\sigma_{ai}/\sigma_{amax})^m f_i}$$

Nagromadzenie większej liczby tego typu danych, umożliwi w przyszłości przewidywanie przybliżonego przebiegu krzywych trwałości zmęczeniowej na etapie konstruowania elementów i układów, poddanych w warunkach eksploatacji obciążeniom losowym.

Przedstawiona analiza dotyczy ściśle przyjętych warunków badań, a w szczególności charakteru losowych zmian naprężeń, które stanowiły podstawę badań zmęczeniowych z obciążeniem losowym i programowanym. Omówione w punkcie 2 losowe naprężenia charakteryzują się stosunkowo łagodnym przebiegiem, w którym nie obserwuje się nagłych przeciążeń. Występowanie w obciążeniach losowych nagłych przeciążeń o małej częstotliwości występowania może powodować znaczne obniżenie trwałości w stosunku do trwałości zmęczeniowej wyznaczonej w programowanych badaniach zmęczeniowych. Widma naprężeń dla tego typu przebiegów losowych charakteryzują się małymi wartościami współczynnika wypełnienia.

6. Wnioski

Przeprowadzona analiza uzyskanych rezultatów umożliwia sformułowanie następujących wniosków.

1. Badania zmęczeniowe próbek okrągłych ze stali 45 z obciążeniem losowym i programowanym wykazały, że różnice wartości trwałości zmęczeniowej wyznaczone na ich podstawie są nieistotne w całym zakresie naprężeń maksymalnych w widmie przyjętym do badań.

2. W programowanych badaniach zmęczeniowych z wykorzystaniem czterech różnic ukształtowanych programów o wartościach naprężeń stopniowo rosnących (*SR*), stopniowo malejących (*SM*), stopniowo malejących i rosnących (*SRM*) oraz o losowym następstwie stopni wartości naprężeń (*SL*), nie stwierdzono istotnego wpływu ukształtowania programu na wyznaczoną trwałość zmęczeniową w całym zakresie naprężeń maksymalnych w widmie przyjętym do badań.

3. Najbardziej zbliżony przebieg do krzywej trwałości zmęczeniowej wyznaczonej przy obciążeniu losowym mają krzywe wyznaczone w programowanych badaniach zmęczeniowych ze stopniowo rosnącymi i malejącymi wartościami naprężeń (*SRM*) i z losowym

настęпством stopni wartości naprężeń (SL). Różnice średnich wartości trwałości dla wymienionych krzywych wynoszą około 20%.

4. Nieistotny wpływ sekwencji obciążeń na przebiegi krzywych trwałości zmęczeniowej, umożliwia wyznaczenie zależności parametrów krzywych trwałości od parametrów krzywej zmęczeniowej. Podstawowymi zależnościami umożliwiającymi przewidywanie przebiegu krzywej trwałości zmęczeniowej na podstawie znanej krzywej zmęczeniowej są: stosunek wartości współczynnika kierunkowego krzywej zmęczeniowej do wartości współczynnika kierunkowego krzywej trwałości zmęczeniowej oraz podobny stosunek wyrazów wolnych w równaniach podanych w tablicy 2 i wzorze (4), wartości te wynoszą średnio: 1,34 i 1,01.

5. Doświadczalna weryfikacja hipotezy liniowej kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych wykazała, że różnice między wynikami obliczeń i badań trwałości zmęczeniowej zależą od wartości naprężeń w widmie. Dla przyjętych warunków badań największą zgodność wyników obliczeń i badań zmęczeniowych otrzymano dla wartości względnych naprężeń $\sigma_{a\max}/Z_{g0} \cong 1,3$. Powyżej wartości 1,3 trwałość zmęczeniowa obliczona jest większa, natomiast dla wartości $\sigma_{a\max}/Z_{g0} < 1,3$ mniejsza od doświadczalnej.

Literatura cytowana w tekście

1. J. SZALA, Obliczenia trwałości zmęczeniowej układów w oparciu o wybrane hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych i ich doświadczalna weryfikacja, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Bydgoszczy, 9 (1974). 197—137.
2. G. JACOBY, Comparison of fatigue lives under conventional program loading and digital random loading. Effects of environment and complex load history on fatigue life. ASTM, STP, 462 (1970) 184.
3. J. SCHIJVE F. A. JACOBS, P. J. TROMP, The effect of load sequence on fatigue crack propagation under random loading and program loading, National Aerospace Laboratory, NLR, RT 71014 U, (1971).
4. H. NOWACK, Biharmonische Beanspruchungsabläufe zur Beurteilung der Schädigung unregelmässiger Beanspruchungen, VDI — Z, 7 (1969) 91—114.
5. J. SZALA, Zagadnienia aproksymacji zmian obciążeń o charakterze losowym w programowanych badaniach trwałości zmęczeniowej, Zeszyty Naukowe, Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, 26 (1975) 141.
6. E. GASSNER, F. W. GRIESE, E. HAIBACH, Ertragbare Spannungen und Lebensdauer einer Schweissverbindung aus Stahl St 37 bei verschiedenen Formen des Beanspruchungskollektivs, Mitteilung, 3 (1964) 255.
7. R. LEHMAN, Ueber die Gültigkeit der Hypothese der linearen Schadensakkumulation, Maschinenbau-technik, 5 (1970) 252.
8. С. В. СЕРЕНСЕН, В. П. КОГАЕВ, Долговечность деталей машин с учетом вероятности разрушения при нестационарном переменном нагружении, Вестник машиностроения, 1 (1966) 7—12.
9. M. RAKOWSKI, Wymuszenie naprężeń o charakterze przypadkowym przy pomocy generatora sygnałów pseudoprzypadkowych, Zeszyty Naukowe Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, 26 (1975) 129.

Резюме

ВЛИЯНИЕ ИСТОРИИ НАГРУЖЕНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

В статье дано описание испытаний усталостной прочности образцов, изготовленных из стали 45. Испытания были проведены с применением случайной и программной нагрузки. В программных испытаниях приняты четыре разных программы: с возрастающей нагрузкой SR , с умень-

шающей нагрузкой SM с возрастающе-уменьшающейся нагрузкой SRM и со случайным порядком появления степеней нагружения SL .

Разница долговечности при случайном и программном нагружении SRM и SL оказалась небольшой. Долговечность при испытаниях с программным нагружением SR была максимально в два раза больше по сравнению со случаем случайной нагрузки.

S u m m a r y

THE EFFECT OF LOAD SEQUENCE ON FATIGUE LIFE

Fatigue lives were studied in 45 steel specimens under random loading and the corresponding program loadings. In the program tests of four types of sequences were employed. This was done in increasing order of amplitudes (SR) increasing — decreasing order (SRM), decreasing order (SM) and random order of amplitudes (SL). The variations of the fatigue life due to the random loading and program loadings SL and SRM were relatively small. The fatigue life was about 20% longer in the latter case. The fatigue life in the SR program test was at most twice times longer than in the random test.

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
BYDGOSZCZ

Praca została złożona w Redakcji dnia 24 czerwca 1977 r.
