

## BADANIA ZMĘCZENIOWE ELEMENTÓW PRZY OBCIĄŻENIACH LOSOWYCH ORAZ PROGRAMOWANYCH Z WYKORZYSTANIEM METODY OBWIEDNI

KAZIMIERZ SZABELSKI (LUBLIN)

W pracy przedstawiono badania trwałości zmęczeniowej elementów samochodu przy programowanych obciążeniach blokowych opracowanych metodą obwiedni (rain flow) oraz przy obciążeniach losowych. W rezultacie stwierdzono, że różnica średnich trwałości zmęczeniowej elementów dla obu metod badań jest nieistotna. Przydatność zastosowanej metody aproksymacji eksploatacyjnego widma obciążeń oceniono również na podstawie rozrzutów wyników trwałości zmęczeniowej.

### 1. WSTĘP

W ocenie eksploatacyjnej trwałości zmęczeniowej elementów i układów poddanych obciążeniom losowym, istotną wciąż rolę odgrywają badania programowane. Wprawdzie w ostatnich latach nastąpił znaczny postęp w zakresie metod dotyczących badań stanowiskowych przy obciążeniach losowych, tym niemniej obserwuje się obecnie duże zainteresowanie wykorzystaniem programowanych badań blokowych. W badaniach tych obciążenia eksploatacyjne zastępuje się odpowiednio uporządkowanymi według wartości amplitud blokami obciążeń harmonicznymi.

Powrót do tego rodzaju badań wynika z możliwości znacznego ich przyspieszenia oraz, w stosunku do innych metod badań trwałości, mniejszych kosztów spowodowanych głównie wykorzystaniem w miarę prostych urządzeń badawczych. W programowanych badaniach blokowych, zastępcze obciążenia harmoniczne powinny być równoważne w sensie zmęczenia odpowiednim obciążeniom eksploatacyjnym. Z tego też względu istotne znaczenie ma wybór odpowiedniej metody aproksymacji losowego widma obciążeń. Najczęściej stosowane metody są przedstawione w pracach [1, 2, 3, 4, 6 i 10]. Dotyczą one jednowymiarowych procesów ergodycznych. Ocenie poszczególnych metod aproksymacji poświęcone są prace [6, 7, 8, 9, 10, 11 i 12].

Szczególne duże rozbieżności w stosunku do wyników badań trwałości zmęczeniowej przy obciążeniach losowych mogą nastąpić przy realizacji programowanych badań blokowych dotyczących widm szerokopasmowych oraz gdy na przebieg wolnozmienny nałożony jest przebieg szybkozmienny o małych amplitudach [5]. W takich przypadkach metody polegające na zliczaniu lokalnych ekstremów pro-

wadzą do zaostrzenia warunków badań, natomiast metody oparte na zliczaniu zakresów rozpiętości łagodzą te warunki.

W ostatnich latach zdobyły popularność metody aproksymacji oparte na założeniu, że losowy przebieg obciążeń składa się z nałożonych na siebie cykli harmonicznych o różnych amplitudach i częstotliwościach. Zalicza się do nich metody: pełnej fali, «range pair» oraz «rain flow». Dwie ostatnie metody w literaturze polskiej [10] występują odpowiednio pod nazwami «par rozpiętości» oraz «obwiedni».

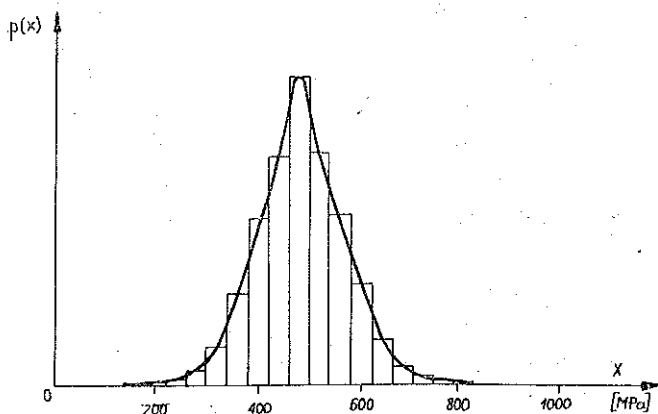
W pracy [6] w rezultacie badań trwałości zmęczeniowej osiowo obciążonych próbek walcowych wykonanych bez karbu ze stopu aluminium 2024-T4 wykazano, że metody par rozpiętości oraz obwiedni pozwalają dla dowolnych widm losowych osiągnąć dość zbliżone wyniki badań zmęczeniowych—w porównaniu z analogicznymi rezultatami przy obciążeniach losowych. Metoda obwiedni jest szczególnie zalecana w przypadkach dużych odkształceń, gdy elementy układów mechanicznych pracują w zakresie niskocyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej. Dla obciążeń o mniejszych wartościach metody par rozpiętości oraz obwiedni prowadzą do praktycznie nieistotnych różnic wyników badań i mogą być traktowane jako równoważne.

Celem niniejszej pracy jest ocena przydatności metody obwiedni w badaniach programowanych piór resorów samochodu. Ocena taka może dotyczyć również badań eksploatacyjnej trwałości zmęczeniowej elementów o podobnych kształtach i cechach materiałowych, poddanych płaskiemu zginaniu.

## 2. OPIS BADAŃ

W czasie około 20 min. jazdy samochodu dostawczego rejestrowano na taśmie magnetycznej naprężenia wywołane zginaniem głównego pióra resoru. Losową funkcję naprężeń charakteryzuje krzywa gęstości rozkładu wartości naprężeń (rys. 1).

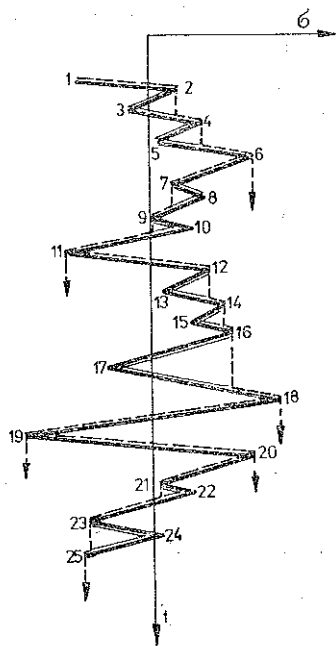
Średnia wartość naprężeń wyniosła 508MPa, a odchylenie standardowe—92,5MPa. Zakres wartości naprężeń występujący w realizacji funkcji losowej wy-



Rys. 1

nosił 159–822 MPa. Stosunek liczby przecięć  $N_0$  poziomu wartości średniej funkcji do liczby lokalnych ekstremów  $N_1$  — przyjął wartość 0,46. Zarejestrowany sygnał analogowy wprowadzony był do maszyny cyfrowej Odra 1204 za pośrednictwem analogowo-cyfrowego czytnika. W urządzeniu tym następowała dyskretyzacja sygnału o wartości kroku  $\Delta t = 1/105$  [s] i przetwarzanie go na sygnał binarny. Program działający w maszynie cyfrowej na prawach systemu operacyjnego organizował transmisję danych do komórek pamięci bębnowej jako źródła informacji dla numerycznego opracowania zapisu. Algorytm analizy losowych widm naprężeń opracowano na podstawie pracy [6], metodą obwiedni. Algorytm ten stanowił podstawę dla sporządzenia programu dla maszyny cyfrowej, który następnie wykorzystano przy schematyzacji odcinka zapisu naprężeń eksploatacyjnych.

W aproksymacji widma losowego metodą obwiedni zlicza się półcykle i cykle w ten sposób, że każdy fragment zapisu uwzględnia się tylko jeden raz. Początkiem zliczanych wielkości są wszystkie lokalne ekstrema. Zasadę opracowania zapisu można zilustrować na przykładzie oscylogramu o pionowej osi czasu (rys. 2).



Rys. 2

Obwiednie zapisu odpowiadające zliczonym półcyklom są takie jak droga kropli deszczu spływającego po dachu pagody. Piki będące początkiem i końcem obwiedni wyznaczają rozpiętości zliczanych półcykli. Fragmenty zapisu nie pokrywane się z obwiedniami są traktowane jako pełne cykle. Algorytm numerycznej analizy widma losowego metodą obwiedni przedstawia rys. 3.

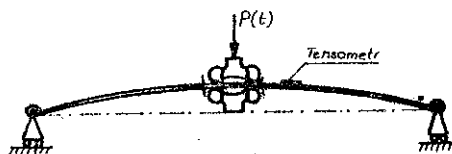
W klasyfikacji numerycznej umownych cykli wykorzystano 32 przedziały klasowe, zliczając średnie wartości poszczególnych cykli oraz odpowiadające im



Cykle naprężeń zredukowano następnie opierając się na krzywej granicznej Soderberga oraz liniowej hipotezie kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych do pięciu poziomów wartości średnich oraz trzynastu wartości amplitud. Blokowy program badań przedstawia rys. 4.

Program ten z założenia był równoważny 10-krotnej realizacji odcinka zapisu magnetycznego. Badania przeprowadzono dla dwóch partii elementów zawierających po sześć piór resorów.

Jedna partia piór badana była przy obciążeniach blokowych, natomiast badania drugiej partii realizowano w warunkach obciążeń losowych. Pióra resorów wykonane były ze stali 60S2A, dla której  $Z_{qo} = 637 \text{ MPa}$ . Obciążenia w postaci sił skupionych przykładano w środku rozpiętości elementów. Obiekt badań oraz sposób jego mocowania na stanowisku badawczym przedstawia rys. 5. Losowy przebieg



Rys. 5

naprężeń odtworzono na hydropulsatorze firmy MTS przez sterowanie siłownikami zapisem magnetycznym. Przebiegi naprężeń w resorach kontrolowano podczas badań zmęczeniowych przy wykorzystaniu tensometru tak samo usytuowanego jak w pomiarach eksploatacyjnych oraz oscylografu pętlcowego. W ramach badań wstępnych otrzymano charakterystykę zmęczeniową piór resorów przy jednostronnych obciążeniach harmonicznym o wartości średniej  $\sigma_m = 508 \text{ MPa}$ , odpowiadającej obciążeniu statycznemu. Charakterystykę zmęczeniową badanych elementów w układzie  $\lg N, \lg \sigma_a$  opisuje funkcja

$$(2.1) \quad \lg N = -4,45 \lg \sigma_a + 15,54.$$

Dla tych samych wyników badań prosta regresji w układzie  $\log N, \lg \sigma$ , gdzie  $\sigma = \sigma_a + \sigma_m$ , przyjmuje postać

$$\lg N = -13,81 \lg \sigma + 44,66.$$

### 3. WYNIKI BADAŃ

W tablicy 1 przedstawiono wyniki badań trwałości zmęczeniowej piór resorów otrzymanych w warunkach obciążeń losowych oraz symulacji blokowej. Pęknięcia zmęczeniowe piór następowały w pobliżu uchwytu mocującego (rys. 5). Wszystkie złomy charakteryzowały się wyraźnie występującymi liniami zmęczeniowymi usytuowanymi na ogół względem jednego ogniska.

Tablica 1

Obciążenia	Liczby realizacji programu do zniszczenia					
Programowane, metodą obwiedni	25	30	33	34	38	44
Losowe	16	20	32	32	42	42

Jak wynika z danych literaturowych, trwałość zmęczeniowa ma rozkład logarytmnormalny. W celu zbadania statystycznej istotności różnicy między średnimi trwałościami zmęczeniowej otrzymanymi dla dwóch zastosowanych metod badań — zastosowano test  $t$ :

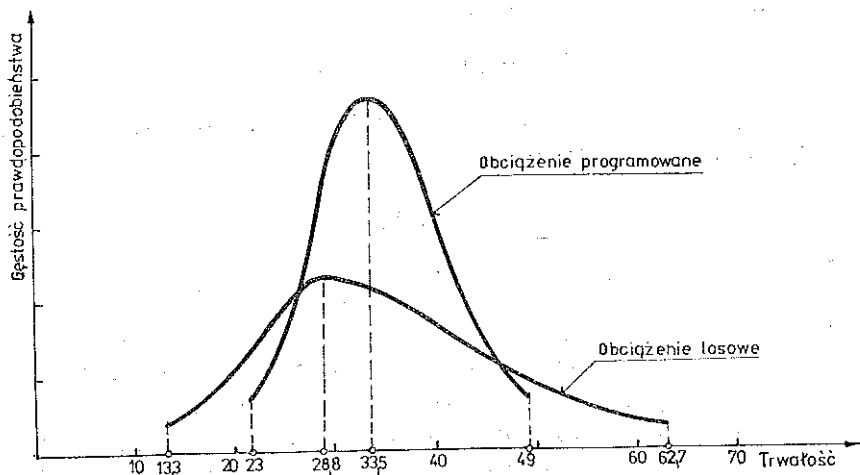
$$t = \left| \overline{\lg X_1} - \overline{\lg X_2} \right| \left[ \frac{nS_1^2 + nS_2^2}{n(n-1)} \right]^{-\frac{1}{2}},$$

gdzie

$$nS_k^2 = \sum_{i=1}^n (\lg X_i - \overline{\lg X_i})^2 \quad (K=1, 2)$$

oraz gdzie  $n$  oznacza liczbę elementów w próbie.

Statystyka (2.1) ma wartość 0,831. Ponieważ przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$  wartość krytyczna  $t=2,571$ , więc dla przyjętego poziomu istotności, brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej dotyczącej równości średnich trwałościami zmęczeniowej otrzymanych dla obciążeń losowych oraz programowanych metodą obwiedni. Wykresy gęstości prawdopodobieństwa, obejmujące 95% wyników trwałościami zmęczeniowej, dla każdej metody badań przedstawia rys. 6. Mimo małej



Rys. 6

liczby badanych elementów, wykresy te przedstawiono ze względu na pogładową ilustrację różnic odpowiednich statystyk dotyczących obu metod badań.

Wyniki badań programowanych cechuje mniejsze odchylenie standardowe stanowiące około 60% miary rozrzutu dotyczącego badań w warunkach obciążeń losowych. Na podkreślenie zasługuje również fakt, że wyniki badań programowanych metodą obwiedni, znajdują się w pełni w zakresie rozrzutu trwałości przy obciążeniach losowych, co ma bardzo istotne znaczenie praktyczne. Uwzględniając rezultaty badań programowanych piór resorów realizowanych przy obciążeniach blokowych opracowanych metodą lokalnych ekstremów oraz rozpiętości gałęzi [11] należy oczekiwać znacznie lepszej zgodności wyników badań programowanych metodą obwiedni z trwałością w warunkach obciążeń losowych. Potwierdza to rezultaty badań DOWLINGA [6] przeprowadzonych na osiowo obciążanych próbkach walcowych wykonanych ze stopu aluminium.

#### 4. WNIOSKI

W badaniach trwałości zmęczeniowej piór resorów, realizowanych w warunkach obciążeń losowych oraz przy zastępczych obciążeniach blokowych opracowanych metodą obwiedni, stwierdzona różnica między średnimi trwałości zmęczeniowej jest nieistotna. Świadczy to o dobrej aproksymacji obciążeń losowych zastępczym widmem harmonicznym opracowanym metodą obwiedni. Wyniki programowanych badań blokowych znajdują się w pełni w zakresie rozrzutu trwałości przy obciążeniach losowych. Z tych względów metodę obwiedni można zalecić w programowaniu badań zmęczeniowych elementów o zbliżonych kształtach, cechach materiałowych oraz podobnych, jak w danym przypadku, charakterystykach statystycznych losowych obciążeń zginających.

Uwzględniając wyniki przedstawione w pracy [11], uznać należy, że programowane badania zmęczeniowe oparte na metodzie obwiedni w stosunku do metod lokalnych ekstremów oraz par rozpiętości lepiej zastępują badania prowadzone przy obciążeniach losowych.

#### LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. M. BILY, W. S. IVANOVA, W. F. TERENTIEV, *Pevnost' sucasti a materialov pri premennom zatazeni*, Veda, Bratislava 1976.
2. J. SCHIJVE, *The analysis of random loading-time histories with relation of fatigue tests and life calculations*, NIR. Rep. MP 201, Amsterdam 1961.
3. T. HAAS, *Loading statistics as a basic of structural and mechanical design*, Eng. Dig., March, April, May 1962.
4. H. KAWAMOTO, H. ISHIKOVA, T. ONOE, *O programowaniu losowych obciążeń metodą pełnej fali*, Transp. Jap. Soc. Mech. Eng., 37, 296, 1971.
5. G. Z. ZAJCEV, A. I. ARONSON, *Ustalostnaja procnost' detalej gidroturbin*, Masinostroenije, Moskva 1975.
6. N. E. DOWLING, *Fatigue failure predictions for complicated stress-strain histories*, Journal of Materials, IMLSA, 7, 1 pp. 71-87, March 1972.

7. J. KOWALEWSKI, *On the relation between fatigue lives under random loading, full-scale fatigue testing of aircraft structures*, Pergamon Press, 1961.
8. H. KAWAMOTO, H. ISHIKAWA, *A new mechanical random fatigue testing machine and some results*, Bull. ISME 14, 72, 1971.
9. J. SZALA, *Wpływ sekwencji obciążeń na trwałość zmęczeniową*, Mech. Teoret. Stos., 16, 2, 1978.
10. J. SZALA, *Badania i obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych*, Prace IPPT 6, Warszawa 1979.
11. K. SZABELSKI, Z. MUSZYŃSKI, R. SADOWSKI, W. BUBIEŃ, *Trwałość zmęczeniowa elementów przy stochastycznych i zastępczych widmach obciążeń*, Arch. Bud. Masz., 27, 1, 1980.
12. J. C. CONOVER, H. R. JAECKEL, W. J. KIPPOLA, *Simulation on field loading in fatigue testing*, SEA Transactions, 75, 543-556, 1967.

## Резюме

### УСТАЛОСТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ И ПРОГРАММИРОВАННЫХ НАГРУЗКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОГИБАЮЩЕЙ

В работе представлены исследования усталостной прочности элементов автомобиля при программированных блочных нагрузках, разработанных методом огибающей, и при случайных нагрузках. В результате констатировано, что разница средних усталостных прочностей элементов, для обоих методов исследований, незначительна. Пригодность примененного метода аппроксимации эксплуатационного спектра нагрузок оценена тоже на основе разбросов результатов усталостной прочности.

## SUMMARY

### FATIGUE ANALYSIS OF ELEMENTS SUBJECT TO RANDOM AND PROGRAMMED LOADS BY MEANS OF THE METHOD OF ENVELOPES

Fatigue life investigations are presented for the automobile elements subject to programmed block loads prepared by the method of envelopes, and to random loads. It is found that the difference of the mean fatigue lives of the elements in the both cases is not considerable. Applicability of the method of approximation loading spectrum is also evaluated from the point of view of the results concerning the fatigue lives.

POLITECHNIKA LUBELSKA

*Praca została złożona w Redakcji dnia 17 marca 1980 r.*