

OCENA STANU OBIEKTU PODDANEGO EKSPLOATACYJNYM OBCIĄŻENIOM NA PODSTAWIE HIPOTEZY LINII STAŁYCH USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH

Józef SZALA

Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwość zastosowania hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych opartej na koncepcji linii stałych uszkodzeń do oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego obiektu w warunkach obciążeń eksploatacyjnych. Z literatury znane są przypadki zastosowań liniowych hipotez sumowania uszkodzeń, w których stopień uszkodzenia opisywany jest stosunkiem liczby zrealizowanych cykli do liczby powodującej pęknięcie zmęczeniowe. Nowością w proponowanej metodzie jest zastosowanie nieliniowej hipotezy sumowania opartej na koncepcji linii stałych uszkodzeń, mającej uzasadnienie w wynikach badań zjawisk zmęczeniowych w metodach w warunkach obciążeń cyklicznych. Wyniki obliczeń zweryfikowano wynikami badań doświadczalnych.

Słowa kluczowe: eksploatacja, diagnostyka, zmęczeniowe pękanie, monitorowanie uszkodzenia.

EVALUATION OF THE STATE OF AN OBJECT UNDER SERVICE LOADING ON THE BASIS OF HYPOTHESIS OF CONSTANT FATIGUE DAMAGE LINES

Summary

In the article there was presented possibility of application of fatigue damage accumulation hypothesis based on the idea of the constant damage line for evaluation of the level of fatigue damage of the object in conditions of service loading. From the literature there are known examples of application of line damage accumulation hypothesis, where the level of damage is described as a relation of the number of realized cycles and the number causing a fatigue crack. The novelty in the proposed method is the application of non-linear hypothesis of accumulation based on the idea of constant damage lines, that has its grounds in results of metal fatigue tests in conditions of cyclic loading. Results of calculations were verified by results of experimental tests.

Keywords: operation, diagnostics, fatigue cracking, damage monitoring.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a_i – współczynnik kierunkowy w opisie wykresu zmęczeniowego (a_g), linii stałych uszkodzeń (a_i) oraz linii początkowego uszkodzenia (a_o),
- b_i – wyraz wolny w opisie wykresu zmęczeniowego (b_g), linii stałych uszkodzeń (b_i) oraz linii początkowego uszkodzenia (b_o),
- D – stopień uszkodzenia zmęczeniowego,
- i – oznaczenie poziomu naprężenia ($i = 1, 2, \dots, k$),
- k – liczba poziomów naprężeń uwzględniana w analizie,
- LSU – oznaczenie hipotezy sumowania uszkodzeń opartej na koncepcji linii stałych uszkodzeń zmęczeniowych,
- N – liczba cykli sinusoidalnych naprężeń o stałej amplitudzie do pęknięcia zmęczeniowego,
- N_c – całkowita liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego dla naprężeń o zmiennych amplitudach (program naprężeń) lub naprężeń losowych,
- n – liczba cykli sinusoidalnych naprężeń o stałej amplitudzie,

- n_o – sumaryczna liczba cykli w okresie programu naprężeń,
- n_{oi} – liczba cykli w okresie programu naprężeń odpowiadająca i -temu poziomowi amplitudy naprężeń σ_{ai} ,
- PM – oznaczenie liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych,
- λ – liczba powtórzeń okresu programu o liczbie cykli n_o do pęknięcia zmęczeniowego,
- σ_a – amplituda naprężenia w MPa,
- σ_{ai} – amplituda naprężenia odpowiadająca i -temu poziomowi w programie naprężeń w MPa.

1. WPROWADZENIE

Trwałość zmęczeniowa elementów konstrukcyjnych zależy od przebiegu procesu zmęczenia, na który wpływa wiele czynników eksploatacyjnych z jednej strony i własności zmęczeniowe obiektu (odporność na zmęczenie) z drugiej strony.

Diagnozowanie złożonych obiektów ze względu na zmęczeniowe pękanie jest trudne, ponieważ mogą wystąpić: jednoogniskowe pęknięcia, wieloogniskowe pęknięcia w jednym elemencie i wieloogniskowe pęknięcia w wielu elementach [1]. W tym ostatnim przypadku wyznacza się mapy pęknięć zmęczeniowych. Przykładem danych do opracowania takiej mapy może być wynik inspekcji pęknięć zmęczeniowych kadłuba statku opisany w pracy [2].

Zmęczeniem nazywa się złożony splot zjawisk występujących w materiale, który poddany jest obciążeniom cyklicznym, zależnych od wartości i czasu trwania (lub liczby cykli) tego obciążenia [3].

W początkowej fazie proces ten obejmuje zjawiska lokalne (w mikro objętościach materiału), w końcowych fazach prowadzi do „globalnych” zniszczeń. Z uwagi tej wynika, że diagnozowanie obiektu ze względu na wystąpienie pęknięć zmęczeniowych wymaga wyznaczenia stref inicjacji pęknięć, następnie śledzenia zjawisk zmęczeniowych w materiale w tych strefach. Ze względu na brak ścisłego i uniwersalnego opisu procesu zmęczenia w praktyce stosuje się fenomenologiczne opisy zwane hipotezami sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Monograficzne opisy hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych znaleźć można w pracach [4] i [5].

Zakres tego artykułu obejmuje opis możliwości oceny stopnia uszkodzenia materiału w strefach zmęczeniowego pękania i koncepcję układu do monitorowania stanu obiektu ze względu na zmęczeniowe pękanie.

W znanych opisach tego rodzaju układów stosowana jest liniowa hipoteza sumowania uszkodzeń zmęczeniowych (PM). W niniejszym artykule zastosowano hipotezę opartą na koncepcji linii stałych uszkodzeń (LSU) w ujęciu naprężeniowym, które odpowiada zakresowi tzw. wysokocyklowej trwałości zmęczeniowej. Podobne opisy hipotez w ujęciu odkształceniowym i energetycznym [5] można zastosować dla zakresów tzw. niskocyklowej trwałości zmęczeniowej.

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

2.1. Uwagi ogólne

Najstarszą hipotezą sumowania uszkodzeń zmęczeniowych jest liniowa hipoteza sformułowana przez A. Palmgrena w roku 1924 dla obliczeń łożysk tocznych, w których pod wpływem zmiennych naprężeń kontaktowych występowało zmęczenie powierzchniowe [7].

Rozwinięcia hipotezy liniowej, a przede wszystkim podania jej opisu w ujęciu energetycznym dokonał M.A. Miner w roku 1945. Od tego czasu zwana jest hipotezą Palmgrena-Minera (PM).

W punkcie tym przytoczony zostanie krótki opis tej hipotezy, ponieważ:

- jest ona powszechnie stosowana ze względu na prostotę opisu procesu sumowania uszkodzeń,

- w literaturze znaleźć można szeroki opis jej doświadczalnej weryfikacji [9],
- na jej bazie budowane są testery w diagnostyce elementów maszyn i elementów konstrukcyjnych zagrożonych w warunkach eksploatacji pęknięciami zmęczeniowymi.

Z wymienionych względów jest ona często stosowana w analizie porównawczej w stosunku do innych hipotez i w takim charakterze zastosowana będzie w niniejszej pracy.

Główne krytyczne uwagi formułowane na jej temat dotyczą tego, że ma ona słabe uzasadnienie fizyczne. Spośród znanych hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych uwzględniających w różnym stopniu proces zmęczenia przyjęto, do analizy podstawowych zagadnień w prezentowanej pracy, hipotezę opartą na koncepcji linii stałych uszkodzeń (LSU), której założenia podał S. Subramanian [9], a zasadnicze rozwinięcie i definicję linii stałych uszkodzeń podał autor w pracy [10].

2.2. Liniowa hipoteza sumowania uszkodzeń zmęczeniowych (PM)

W warunkach stałoamplitudowych, sinusoidalnych naprężeń, proces sumowania uszkodzeń zmęczeniowych może być opisany funkcją:

$$D_n = f(n), \quad (1)$$

dla której przyjmuje się, że

$$D_0 = f(0) = 0 \quad \text{i} \quad D_N = f(N) = 1,0, \quad (2)$$

gdzie:

N – liczba cykli do zniszczenia zmęczeniowego (w zależności od przyjętego kryterium: do całkowitego pęknięcia lub pojawienia się dostrzegalnego makropęknięcia zmęczeniowego),
 n – liczba cykli naprężeń; $n \leq N$.

W liniowych hipotezach zakłada się, że w przypadku stałoamplitudowego naprężenia każdy cykl, niezależnie od fazy procesu, w jednakowym stopniu przyczynia się do uszkodzenia, tzn. że uszkodzenie jest liniową funkcją liczby cykli

$$D_n = \frac{n}{N}. \quad (3)$$

Ilustrację graficzną wzorów od (1) do (3) przedstawiono na rys. 1a. Dla przykładu naprężeniu sinusoidalnemu o amplitudzie σ_{a1} odpowiada liczba N_1 cykli do pęknięcia zmęczeniowego odczytana lub obliczona z wykresu zmęczeniowego Wöhlera. Podobnie amplitudzie σ_{a2} odpowiada liczba cykli N_2 . Dla tego samego uszkodzenia $D_{n1} = D_{n2}$ na poziomach amplitud naprężenia σ_{a1} i σ_{a2} należy zrealizować n_1 i n_2 liczby cykli, natomiast stosunki n_1/N_1 i n_2/N_2 z definicji są jednakowe. Wykresy te w układzie wartości względnych pokazano na rys. 1b.

W przypadku wielostopniowego programu naprężeń pęknięcie zmęczeniowe nastąpi, jeżeli spełniony zostanie warunek

$$D_{N_c} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1,0. \quad (4)$$

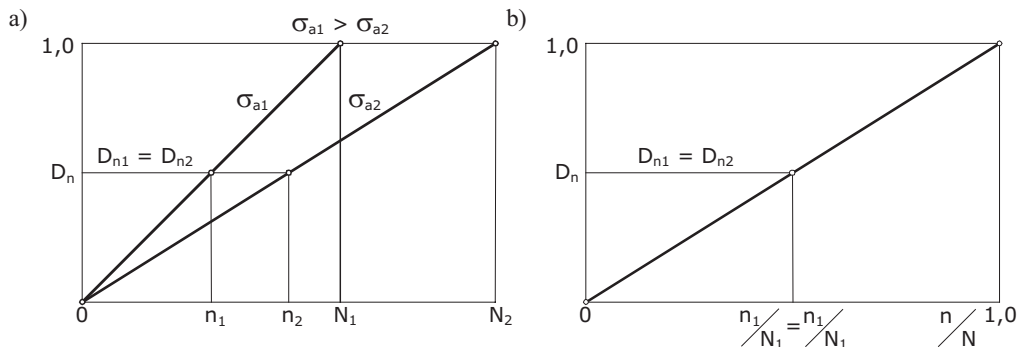
Podobnie dla ciągłego rozkładu amplitud

$$D_{N_C} = \int_{\sigma_{a \min}}^{\sigma_{a \max}} \frac{dn}{N(\sigma_a)} = 1,0 \quad (5)$$

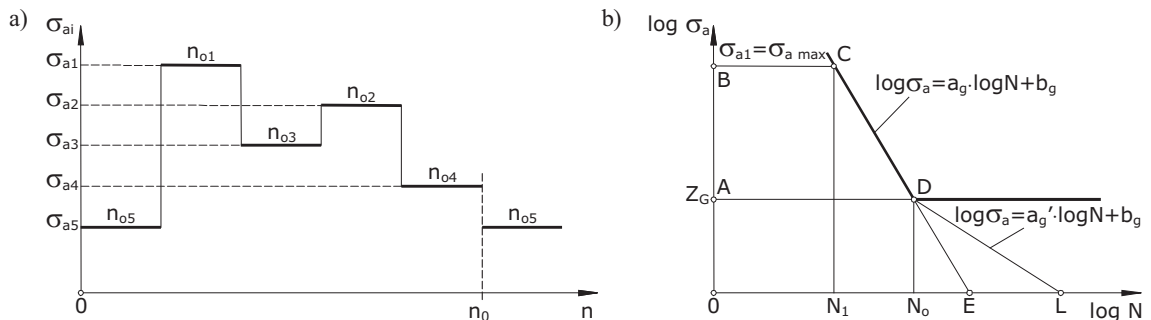
W klasycznej hipotezie PM przyjmuje się, że w procesie sumowania uszkodzeń zmęczeniowych biorą udział stopnie naprężeń od 1 do k o wartościach amplitud nie mniejszych od granicy zmęczenia $\sigma_{a \min} \geq Z_G$. Ilustrację graficzną zastosowania hipotezy PM dla wielostopniowego widma naprężenia pokazano na rys.2. Na schemacie programu naprężeń (rys. 2a) pokazano przykładowo losowe następstwo stopni: 5, 1, 3, 2 i 4 o odpowiednich wartościach amplitud naprężenia: σ_{a5}, σ_{a1} ,

σ_{a3}, σ_{a2} i σ_{a4} , którym odpowiadają liczby cykli w programie: $n_{o5}, n_{o1}, n_{o3}, n_{o2}$ i n_{o4} oraz liczby cykli do pęknięcia zmęczeniowego: N_5, N_1, N_3, N_2 i N_4 . Program naprężeń opracowywany jest na podstawie pomiarów na ograniczonym odcinku pomiarowym lub ograniczonym czasie pomiaru. Temu odcinkowi pomiarowemu odpowiada sumaryczna liczba cykli

$$n_o = \sum_{i=1}^k n_{oi} \cdot \quad (6)$$



Rys. 1. Ilustracja graficzna liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren – Minera (PM): a) wykresy uszkodzeń dla różnych wartości amplitudy naprężeń ($\sigma_{a1} > \sigma_{a2}$), b) wykresy uszkodzeń w układzie wartości względnych



Rys. 2. Ilustracja graficzna zastosowania hipotezy PM do obliczeń stopnia uszkodzenia w przypadku wielostopniowych widm naprężeń: a) schemat fragmentu widma naprężeń, b) wykres zmęczeniowy Wöhlera

Program tak opracowany, zwany także blokiem naprężeń, w badaniach lub obliczeniach powtarza się λ razy do pęknięcia zmęczeniowego, czyli trwałość zmęczeniowa w liczbie cykli równa się

$$N_C = \lambda \cdot n_o = \sum_{i=1}^k n_{oi} \cdot \quad (7)$$

Według hipotezy PM, sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych zachodzi w obszarze pod wykresem zmęczeniowym wyznaczonym punktami ABCD (rys. 2b).

Z licznych badań w warunkach naprężeń programowanych (programy blokowe) i stochastycznych wynika, że naprężenia poniżej granicy zmęczenia mają także wpływ na sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych, zwłaszcza w końcowej

fazie procesu zmęczenia [11].

Wpływ ten uwzględniono przez modyfikację wykresu zmęczeniowego przedłużając gałąź ograniczonej wytrzymałości CD poniżej granicy zmęczenia CDE lub modyfikując jej przebieg – linia CDL. Tego rodzaju modyfikacje powiększają odpowiednio obszar, w którym zachodzi sumowanie uszkodzeń odpowiednio do obszarów wyznaczonych punktami: w pierwszym przypadku OABCDE w drugim przypadku OABCDL.

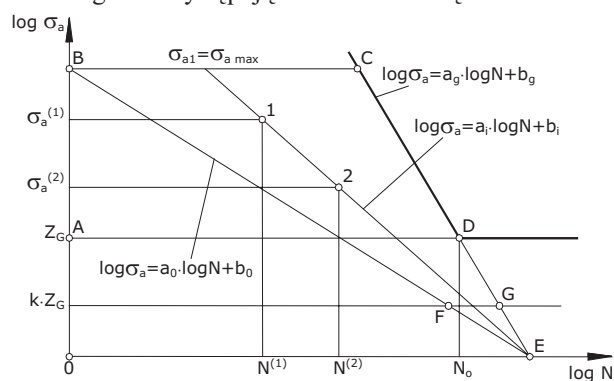
2.3. Hipoteza oparta na koncepcji linii stałych uszkodzeń zmęczeniowych (LSU)

W opisach procesu zmęczenia zamieszczonych w pracach [3], [6] i [12] pole pod wykresem Wöhlera (pole uszkodzeń zmęczeniowych) podzie-

lono liniami odpowiadającymi występowaniu określonych zjawisk zmęczeniowych: od pojawienia się pierwszych poślizgów do linii odpowiadającej stanowi granicznemu, w zależności od przyjętego kryterium zniszczenia, makropęknięcia lub całkowitemu złomowi. Linie te są podstawą określenia linii stałych uszkodzeń, z których wynika, że określony stopień uszkodzenia obiektu określa punkt w polu uszkodzeń, którego położenie zależy od poziomu naprężeń zmęczeniowych i liczby cykli tego naprężenia. Linia stałego uszkodzenia zmęczeniowego jest miejscem geometrycznym tych punktów (rys. 3).

Na podstawie analizy wyników badań opisanych w pracach [3] i [6] przyjęto następujące założenia:

- linie stałych uszkodzeń w układzie współrzędnych $\log N$, $\log \sigma_a$ są prostymi przecinającymi się w jednym punkcie E (rys. 3), w którym linia graniczna (wykres Wöhlera) przecina oś odciętych,
- pole uszkodzeń zmęczeniowych ograniczone jest liniami: stanu początkowego (BE), którą można interpretować jako linię Frencha [13], linią (BC) odpowiadającą $\sigma_{a1} = \sigma_{a \max} = \text{const}$, linią CG (wykres Wöhlera) wyznaczającą stan graniczny (pęknięcie zmęczeniowe), linią (FG) określającą poziom naprężenia $\sigma_{ad} = k \cdot Z_G = \text{const}$, poniżej którego nie występują uszkodzenia zmęczeniowe.



Rys. 3. Ilustracja graficzna opisu linii stałych uszkodzeń zmęczeniowych

Zgodnie z założeniami hipotezy, stopień uszkodzenia odpowiadający naprężeniu o amplitudzie $\sigma_a^{(1)}$ po $N^{(1)}$ cyklach sinusoidalnych wyznacza na rys. 3 punkt 1. Ten sam stopień uszkodzenia zachodzi w warunkach naprężenia stałoamplitudowego o wartości $\sigma_a^{(2)}$ po zrealizowaniu $N^{(2)}$ cykli – punkt 2, a linia stałego uszkodzenia opisana jest funkcją:

$$\log \sigma_a = a_i \cdot \log N + b_i \quad (8)$$

Odpowiednio linia stanu początkowego ma postać

$$\log \sigma_a = a_0 \cdot \log N + b_0 \quad (9)$$

oraz linia stanu granicznego ma postać

$$\log \sigma_a = a_g \cdot \log N + b_g \quad (10)$$

gdzie:

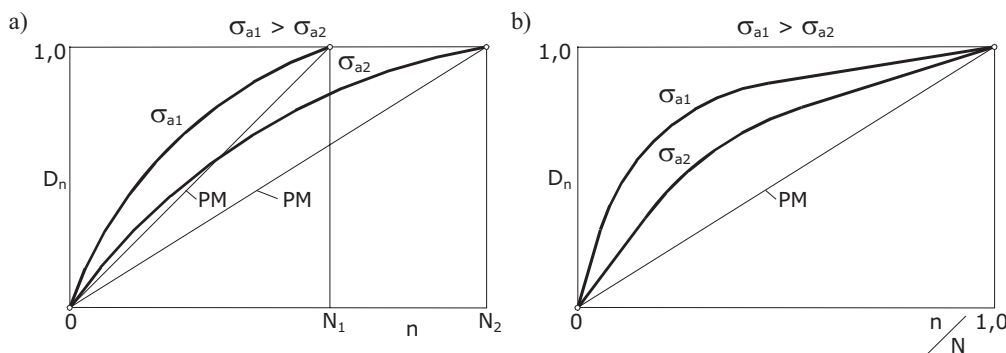
- a_i – współczynniki kierunkowe linii stałych uszkodzeń,
- a_0 – współczynnik kierunkowy linii stanu początkowego,
- a_g – współczynnik kierunkowy linii stanu granicznego,
- b_i, b_0, b_g – odpowiednie wyrazy wolne.

Istotnym elementem opisu procesu sumowania uszkodzeń jest zdefiniowanie stanu uszkodzenia, który dla hipotezy PM opisany jest wzorem (3). W przypadku hipotezy LSU stan ten opisany jest następująco

$$D_i = \frac{a_i - a}{a_g - a_0}, \quad (11)$$

co dla stanu początkowego daje $D_0 = 0$, a dla stanu granicznego $D_N = 1,0$. Wykres uszkodzenia w funkcji liczby cykli dla stałoamplitudowego naprężenia sinusoidalnego pokazano na rys. 4.

Dla porównania na wykresach pokazano linie odpowiadające liniowej hipotezie PM. Z rys. 4 wynika, że opisywana hipoteza jest hipotezą nieliniową, a uszkodzenie zmęczeniowe zależy nie tylko od liczby cykli obciążenia, a także silnie zależy od wartości amplitudy naprężeń.



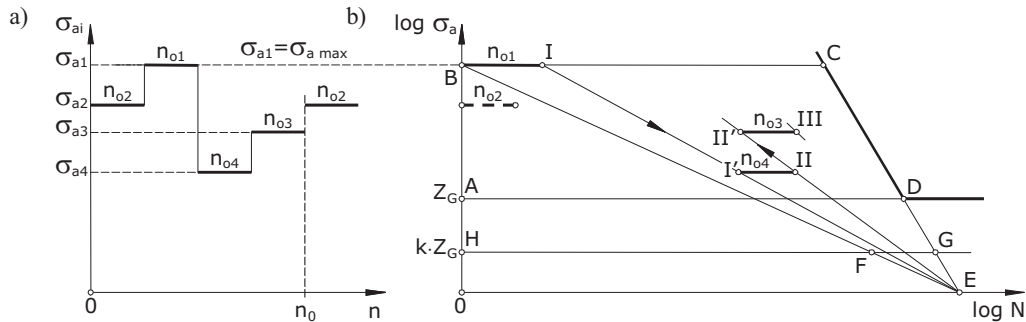
Rys. 4. Ilustracja graficzna hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych opartej na koncepcji linii stałych uszkodzeń:

- a) zależność uszkodzenia od liczby cykli sinusoidalnych o stałej amplitudzie,
- b) zależność uszkodzenia od względnej liczby cykli; PM – linie odpowiadające hipotezie PM

Ilustrację graficzną zastosowania hipotezy (LSU) dla wielostopniowego programu naprężeń pokazano na rys. 5. Podobne postępowanie ma miejsce w

przypadku losowej zmienności wartości naprężeń, co odpowiada stochastycznym obciążeniom eksploatacyjnym.

SZALA, Ocena stanu obiektu poddanego eksploatacyjnym obciążeniom na podstawie ...



Rys. 5. Graficzna ilustracja zastosowania hipotezy (LSU) dla naprężeń wielostopniowych: a) fragment widma naprężeń, b) schemat sumowania uszkodzeń

Po zrealizowaniu pierwszego stopnia o amplitudzie σ_{a2} i liczbie cykli n_{o2} w materiale elementu konstrukcyjnego nie wystąpiło uszkodzenie zmęczeniowe. Następny stopień o wartości amplitudy σ_{a1} i liczbie cykli n_{o1} spowodował uszkodzenie odpowiadające punktowi I, który z punktem E wyznacza linię stałych uszkodzeń (IE). Kolejny stopień naprężeń w programie σ_{a4} wyznacza punkt I' o tym samym uszkodzeniu co I i od niego następuje realizacja n_{o4} cykli, wyznaczając punkt II, który leży na linii uszkodzeń (II'E). Realizacja n_{o3} cykli naprężeń o amplitudzie σ_{a3} rozpoczyna się od punktu II' wyznaczając kolejny punkt III w obszarze uszkodzeń. Graniczny stan uszkodzenia wystąpi gdy kolejny stopień naprężeń σ_{ai} o pojemności n_{oi} przekroczy linię graniczną (wykres Wöhlera).

Trwałość zmęczeniowa elementu konstrukcyjnego jest sumą cykli zrealizowanych do osiągnięcia linii stanu granicznego (CE) uwzględniając także te cykle, które nie spowodowały uszkodzenia zmęczeniowego (w przytoczonym przykładzie cykle n_{o2})

$$N_C = \lambda \cdot n_o + \sum_{i=1}^r n_{oi}, \quad (12)$$

gdzie:

n_o – liczba cykli w bloku naprężeń,

λ - liczba pełnych powtórzeń bloku naprężeń do osiągnięcia stanu krytycznego,

n_{oi} – liczba cykli na i-tym stopniu naprężeń w bloku programu, który nie spowodował przyrostu uszkodzenia,

r – liczba stopni naprężeń nie powodujących przyrostu uszkodzenia.

Dla każdego punktu I, II, ..., K można określić ze wzoru (11) stopień uszkodzenia D.

Należy podkreślić, że w przytoczonym przykładzie stopień o amplitudzie σ_{a2} i liczbie cykli n_{o2} tylko w pierwszym powtórzeń bloku naprężeń nie spowodował uszkodzenia, we wszystkich następnych bierze on czynny udział w sumowaniu uszkodzeń zmęczeniowych.

Analizując przebieg sumowania uszkodzeń według schematu pokazanego na rys. 5 łatwo stwierdzić, że na przebieg tego procesu wpływa kolejność (sekwencja) stopni naprężeń, co jest zgodne z wynikami doświadczeń opisanych w pracach [14] i [15].

3. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA

Możliwość zastosowania hipotezy linii stałych uszkodzeń zmęczeniowych do oceny stanu uszkodzenia zmęczeniowego elementu maszynowego poddano weryfikacji poprzez porównanie wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej z wynikami badań eksperymentalnych.

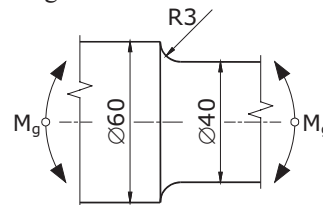
3.1. Obiekt badań

Obiektem badań była oś wykonana ze stali 45 (rys. 6) o następujących własnościach mechanicznych: $R_m = 776$ MPa, $R_c = 400$ MPa, $Z_{G0} = 165,5$ MPa.

Wykres zmęczeniowy graniczny ma następującą postać

$$\log \sigma_a = -0,2191 \cdot \log N + 3,4929. \quad (13)$$

Oś w warunkach eksploatacji podlega obrotowemu zginaniu.



Rys. 6. Schemat czopa osi

3.2. Obciążenie eksploatacyjne

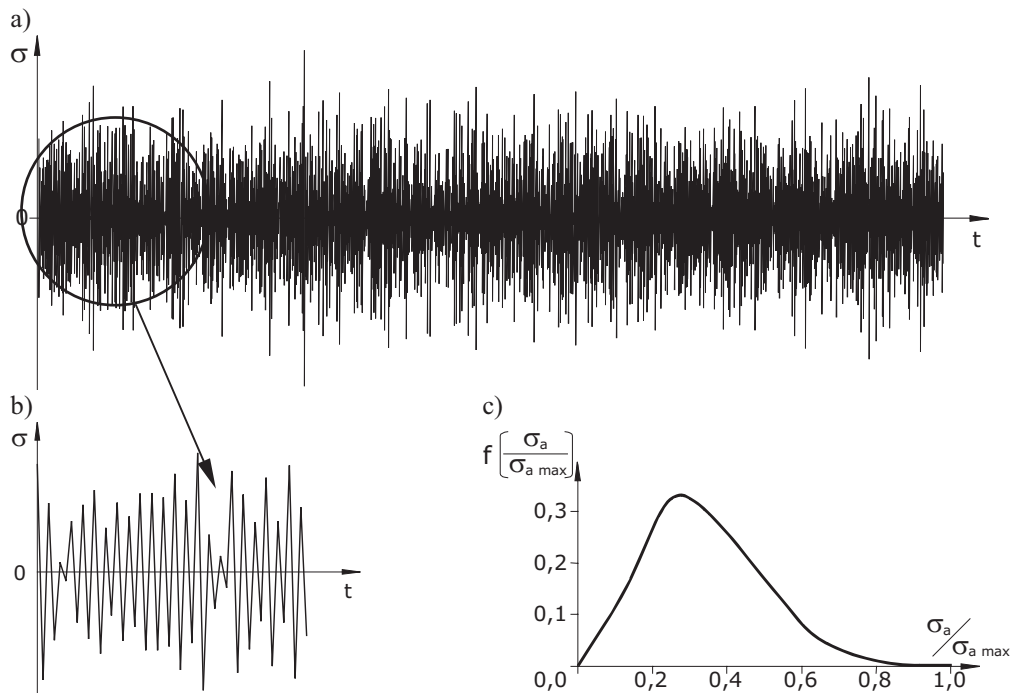
Obciążenie eksploatacyjne pokazano na rys. 7a oraz 7b. Rozkład amplitud (rys.7c) opisany jest rozkładem Rayleigha

$$f\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{a \max}}\right) = 20 \cdot \frac{\sigma_a}{\sigma_{a \max}} \cdot \exp\left[-10 \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{a \max}}\right)^2\right]. \quad (14)$$

3.3. Wyniki badań doświadczalnych

Osie podano obrotowemu zginaniu zgodnie z obciążeniem opisany wzorem (14) na różnych poziomach wartości maksymalnej amplitudy $\sigma_{a \max}$. Rejestrując sumaryczną liczbę cykli do pęknięcia uzyskano zbiór punktów wyznaczający wykres trwałości zmęczeniowej, który w układzie współrzędnych $\log \sigma_{a \max}$, $\log N_C$ jest linią prostą opisaną funkcją:

$$\log \sigma_{a \max} = -0,167 \cdot \log N_C + 3,393. \quad (15)$$



Rys. 7. Fragment losowego obciążenia eksploatacyjnego (a) wraz z powiększeniem (b) oraz rozkładem amplitud obciążenia (c)

3.4. Obliczenia trwałości zmęczeniowej

Zgodnie z opisem hipotezy linii stałych uszkodzeń podanym w punkcie 2 dla takich samych warunków przeprowadzono obliczenia trwałości zmęczeniowej osi.

Do obliczeń przyjęto:

- linię graniczną zgodnie z wzorem (13),
- linię uszkodzenia początkowego w postaci

$$\log \sigma_a = -0,175 \cdot \log N + 2,793, \quad (16)$$
- naprężenie $\sigma_{ad} = k \cdot Z_G = 0,4 \cdot 165,5 = 66,2$ MPa.

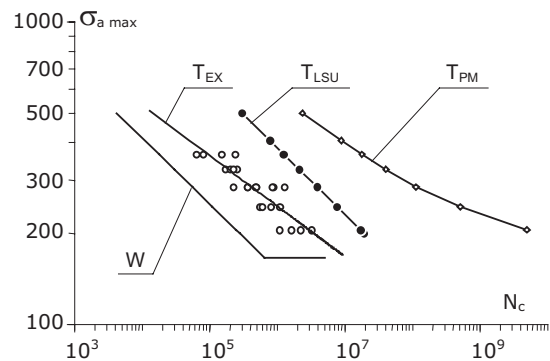
Wyniki obliczeń w postaci zbioru punktów wyznaczają obliczeniowy wykres trwałości analizowanej osi w postaci:

$$\log \sigma_{a \max} = -0,225 \cdot \log N_c + 3,934. \quad (17)$$

Wykres ten na tle wykresu wyznaczonego w badaniach zmęczeniowych pokazano na rys. 8. Ponadto na tym rysunku zamieszczono dla porównania wykresy: zmęczeniowy Wöhlera (W) oraz wykres trwałości wyznaczony z zastosowaniem liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń Palmgrena-Minera (PM).

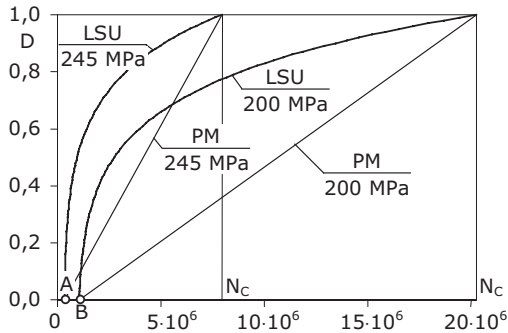
Program obliczeniowy jest tak zaprojektowany, że umożliwia w dowolnym czasie odczyt wartości współczynnika uszkodzenia D z przedziału (0,1) umożliwiając ocenę stanu uszkodzenia zmęczeniowego osi w dowolnym czasie. Zagadnienie to zilustrowano na rys. 9 dla dwóch wybranych poziomów naprężenia maksymalnego w przebiegu obciążenia pokazanego na rys. 7a: $\sigma_{\max} = 200$ MPa i $\sigma_{\max} = 245$ MPa. Z wykresów tych wynika, że trwałość zmęczeniowa wyrażona liczbą cykli N_c jest mniejsza dla naprężeń σ_{\max} o większych wartościach. Początek sumowania uszkodzeń odpowiada punktom A i B odpowiednio

dla wykresów $\sigma_{\max} = 245$ MPa i $\sigma_{\max} = 200$ MPa. Podobnie jak w przypadku obciążenia stałoaamplitudowego wykresy te wskazują na nieliniowy, degresywny charakter procesu sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w przeciwieństwie do liniowego oznaczonego na rysunku jako PM.



Rys. 8. Wykresy trwałości zmęczeniowej: T_{EX} - wykres wyznaczony doświadczalnie, T_{LSU} - wykres wyznaczony na podstawie wyników obliczeń według hipotezy linii stałych uszkodzeń, T_{PM} - wykres wyznaczony na podstawie wyników obliczeń wg hipotezy PM, W – wykres zmęczeniowy Wöhlera

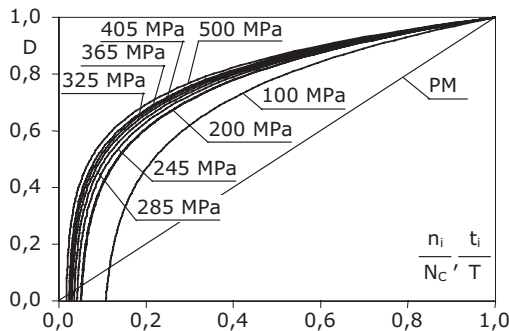
SZALA, Ocena stanu obiektu poddanego eksploatacyjnym obciążeniom na podstawie ...



Rys. 9. Wykresy uszkodzeń zmęczeniowych D w funkcji liczby cykli obciążenia eksploatacyjnego dla dwóch wybranych poziomów naprężenia $\sigma_{\max} = 200 \text{ MPa}$ i $\sigma_{\max} = 245 \text{ MPa}$

Dla dowolnej liczby cykli lub w dowolnym czasie można uzyskać informację o stopniu uszkodzenia monitorowanego obiektu, ponieważ każdej liczbie cykli odpowiada czas realizacji procesu lub w zależności od miary trwałości obiektu: przebieg np. w km (dla pojazdów drogowych), liczba zadań (np. dla elementów układów sterowania, maszyn o nieciągłej pracy) czy liczba lotów przyjmowana w ocenie trwałości samolotów.

Na rys. 10 przedstawiono wykresy uszkodzeń D w funkcji względnej liczby cykli n_i/N_c lub względnego czasu eksploatacji t_i/T dla wszystkich poziomów naprężenia i badań eksperymentalnych opisanych w pracy. Wykresy te wskazują na możliwość opracowania odpowiedniego układu do bieżącej oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego. Koncepcja takiego układu opisana zostanie w następnym punkcie pracy.



Rys. 10. Wykresy uszkodzeń zmęczeniowych D w funkcji względnej liczby cykli obciążenia eksploatacyjnego n_i/N_c lub względnego czasu eksploatacji t_i/T

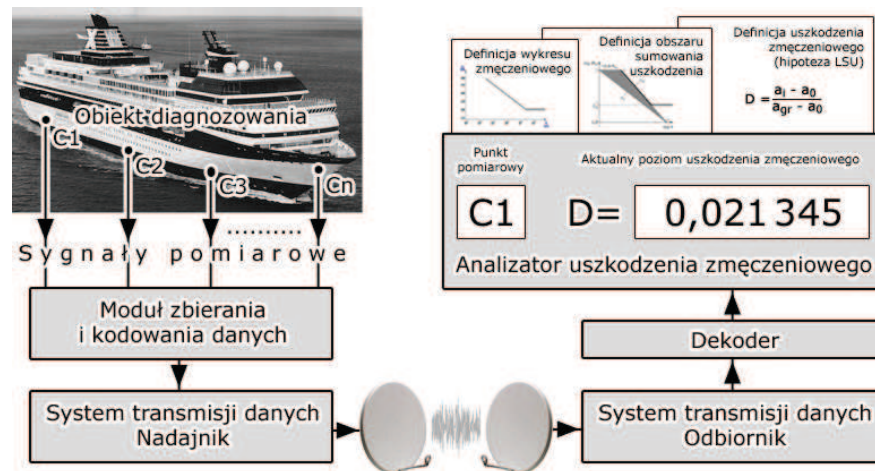
4. PODSUMOWANIE

Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych stosowane są przede wszystkim w obliczeniach trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych

w warunkach obciążeń losowych. Ocena ich zgodności z doświadczeniem, co wynika z poprzedniego stwierdzenia, polega także na analizie zgodności wyników obliczeń z wynikami badań trwałości zmęczeniowej. Z analizy danych literaturowych zamieszczonej w pracy [5] wynika, że stosunek wyników obliczeń i badań trwałości zmęczeniowej, zależnie od warunków obciążenia i własności zmęczeniowych obiektów badań, dla hipotezy PM waha się w skrajnych przypadkach od 0,3 do 30 razy. W przykładzie zamieszczonym w tej pracy dla hipotezy LSU wynosi średnio 2 razy, co z uwagi na złożoność procesu zmęczenia i dużą ilość czynników wpływających na jego przebieg nie jest wynikiem złym, wskazującym jednakże na konieczność dalszych poszukiwań dokładniejszych opisów procesu zmęczenia.

Celem podstawowym artykułu, jak podano w punkcie 1, jest wskazanie możliwości zastosowania hipotezy LSU do diagnozowania stanu obiektów ze względu na zmęczeniowe pękanie. Zwykle interesująca jest możliwość diagnozowania złożonych obiektów, w których występuje wielogniskowe pękanie w wielu elementach obiektu. Ideę układu, który umożliwiłby bieżącą ocenę stopnia uszkodzenia zmęczeniowego pokazano na rys. 11. Jednym z podstawowych problemów jest wyznaczenie punktów pomiarowych w strefach inicjacji i rozwoju pęknięć zmęczeniowych. W tym celu w procesie projektowania przeprowadza się analizę wytrzymałościową metodami analitycznymi lub współcześnie powszechnie stosowanymi metodami numerycznymi (oprogramowanie MES). W obiektach eksploatowanych w dłuższych okresach czasu bardzo przydatne są wyniki inspekcji odpowiednich służb nadzoru. W wymienionych punktach umieszczane są czujniki (na rys. 11 oznaczone literami C_i , gdzie $i = 1, 2, 3, \dots, n$), z których zbiera się odpowiednie sygnały, które po odpowiednim kodowaniu transmitowane są metodami przewodowymi lub bezprzewodowymi z nadajnika do odbiornika sygnałów i dekodera. Opracowane sygnały przekazywane są do odpowiednio zaprogramowanego analizatora uszkodzeń zmęczeniowych zaopatrzonego w wyświetlacz, który dla dowolnie wybranego punktu pomiarowego wyświetla bieżący stopień uszkodzenia zmęczeniowego opisanego wzorem (11). W programie analizatora konieczne jest zdefiniowanie wykresu zmęczeniowego, obszaru sumowania uszkodzeń oraz zależności opisującej stopień uszkodzenia zmęczeniowego (w tej pracy według hipotezy LSU) dla każdego punktu pomiarowego.

Stosowanie tego rodzaju układów do oceny stanu obiektów ze względu na zmęczeniowe pękanie może w istotny sposób obniżyć koszty eksploatacji obiektów, głównie przez obniżenie kosztów napraw i bieżących inspekcji.



Rys. 11. Schemat układu do ciągłego monitorowania stopnia uszkodzeń zmęczeniowych w strefach pęknięcia złożonego obiektu

LITERATURA

- [1] Kaniowski J., Szala J.: Analysis of Fatigue Crack Propagation in Complex Structures. ECF 14 Fracture Mechanics Beyond 2000, EMAS Publishing, 2002, pp. 101-108.
- [2] Rosochowicz K.: Problemy pęknięcia zmęczeniowego kadłubów statków. Wydawnictwo Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk, 2000.
- [3] Kocańda S.: Zmęczeniowe pęknięcie metali. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1985.
- [4] Manson S.S., Halford G.R.: Re-Examination of Cumulative Fatigue Damage Analysis – an Engineering Perspective. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 25, No 5/6, 1986.
- [5] Szala J.: Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz, 1998.
- [6] Bily M., Terentev V.: A Complete Fatigue S/N Curve. Materialprüfung 1, 1973.
- [7] Palmgren A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. Verfahrens-technik, Berlin, 68, 1924.
- [8] Miner M.A.: Cumulative Damage in Fatigue. J. Appl. Mech., 67, 1945.
- [9] Subramanyan S.: A Cumulative Damage Rule Based on the Knee Point of the S/N Curve. Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, A, 1976.
- [10] Szala J.: Sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych w warunkach naprężeń stochastycznych i programowanych. Archiwum Budowy Maszyn, kwartalnik PAN, tom XXVIII, nr 4, 1981.
- [11] Szala J.: Wpływ naprężeń o wartościach mniejszych od nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość zmęczeniową. BTN, seria Mechanika, 10, PWN, Warszawa-Poznań, 1978.
- [12] Szala J.: Przegląd możliwości diagnozowania obiektów technicznych ze względu na zmęczeniowe pęknięcie. Przegląd Mechaniczny, Nr 4/03, 2003, ss. 7-15.
- [13] Jelaska D., Glodez S., Podrug S.: Closed Form Expression For Fatigue Life Prediction At Combined HCF/LCF Loading. Facta Universitatis, Mechanics, Automatic Control and Robotics Vol.3, No 13, 2003, pp. 635 – 646.
- [14] Schijve J., Jacobs F.A., Tramp P.J.: The Effect Load Sequence on Fatigue Crack Propagation under Random Loading and Program Loading, National Aerospace Laboratory, NLR, RT 71014U, 1971.
- [15] Szala J.: The Effect of Load Sequence on Fatigue Life, Czechoslovak Academy of Sciences, Institute of Physical Metallurgy, Brno, 1977.



Józef SZALA, prof. dr hab., kierownik Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn ATR w Bydgoszczy.

Opublikował ponad 150 prac, w tym 2 książki współautorskie, 3 monografie, 6 podręczników akademickich (1 współautorski), 2 rozprawy. Tytuły książek: Podstawy obliczeń

zmęczeniowych (współautor), wydanie III, 1997; Podstawy konstrukcji maszyn (współautor), tom II, wydanie III, 1988. Twórca 7 patentów dotyczących stanowisk badawczych.

Członek m.in. European Structural Integrity Society (ESIS), The Society of Experimental Mechanics (SEM). Członek Akademii Inżynierskiej w Polsce, Komitetu Budowy Maszyn PAN (od 1993 roku przewodniczący). Członek założyciel Międzysekcyjnego Zespołu Zmęczenia i Mechaniki Pęknięcia Materiałów i Konstrukcji KBM PAN (od 1994 roku przewodniczący), Komitetu Mechaniki PAN – Sekcji Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, Bydgoskiego Towarzystwa Naukowego (członek Zarządu, w latach 1988-1990 wiceprzewodniczący), Rady Głównej Nauki i Szkolnictwa Wyższego (w latach 1985-1990).