ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992

Seria: MECHANIKA z. 107 Nr kol. 1154

Krzysztof M.Gołoś, Zbigniew Osiński
Instytut Podstaw Budowy Maszyn
Politechnika Warszawska

MODELOWANIE KUMULACJI USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH

Streszczenie. W pracy przeprowadzono badanie sumowania uszkodzeń zmęczeniowych przy stopniowanych obciążeniach cyklicznych. Przedstawiono ogólną postać funkcji uszkodzenia uwzględniającą wpływ historii obciążenia na proces kumulacji uszkodzeń.

Резюме. В работе проведено исследование накопления усталостных повреждений при ступенчтых циклических нагрузках. Предложена общая форма функции повреждения учитывающая влияние истории нагружений на процесс накопления усталостных повреждений.

Summary. In the paper an investigation of a cumulative fatigue damage under condition of block cyclic loading is presented. General form of damage function including the influence of loading history on cumulative damage has been presented.

1. WSTĘP

Wiele elementów maszyn poddanych jest obciążeniom cyklicznym. Obciążenia cykliczne powodują powstanie uszkodzeń zmęczeniowych, które sumując się mogą doprowadzić do całkowitego zniszczenia konstrukcji. Prognozowanie trwałości elementu konstrukcji wymaga, oprócz przyjęcia określonego kryterium zniszczenia, także znajomości prawa rozwoju uszkodzenia, czyli kumulacji uszkodzeń w warunkach obciążeń cyklicznych. Różne wartości parametru obciążenia ϕ_i działające przez n_i liczbę cykli w różnych sekwencjach w widmie, powodują różny stopień zmęczeniowego uszkodzenia elementu. Konieczność ujęcia w obliczeniach zasięgu i skutków tego rodzaju uszkodzeń zmusiła badaczy do poszukiwania miary tych uszkodzeń.

Badania sumowania uszkodzeń zmęczeniowych przy obciążeniach cyklicznych należą do podstawowych problemów przy ocenie żywotności

elementów konstrukcji [1-5].

Celem pracy jest zaproponowanie modelu sumowania uszkodzeń zmęczeniowych przy stopniowanych obciążeniach. W analizie uwzględniony będzie wpływ historii obciążenia na trwałość zmęczeniową.

2. KONCEPCJA OPISU KUMULACJI USZKODZEŃ

Rozważmy materiał, który został poddany wcześniej obciążeniom cyklicznym tworzącym pewną historię obciążenia, H. Historię obciążenia można przedstawić za pomocą zmiennej ϕ_i kontrolującej proces zmęczenia oraz odpowiadającej jej liczbie cykli n_i, $H=H(\phi_i, n_i)$. Zmienną ϕ_i może być na przykład amplituda naprężenia lub odkształcenia w cyklu, albo gęstość energii odkształcenia w cyklu. Na skutek obciążeń cyklicznych właściwości zmęczeniowe materiału ulegają zmianie. Na proces ten w skali mikroskopowej składa się powstanie i rozwój trwałych pasm poślizgów, inicjacja mikropęknięć a następnie ich stopniowy wzrost aż do zniszczenia elementu.

Niech stan uszkodzenia materiału w rozpatrywanym momencie wynosi D, przy czym dla materiału w stanie naturalnym bez uszkodzeń D=0 zaś w chwili zniszczenia $D=D_f$. W ogólności przyrost uszkodzenia dD zależy od aktualnego stanu uszkodzenia D zdeterminowanego historią obciążenia H, oraz przyrostu cykli dn przy zmiennej ϕ.

Dla tak przyjętych założeń możemy zapisać ogólną zależność na przyrost uszkodzeń zmęczeniowych w postaci

$$dD = f(H(\phi_i, n_i) \rightarrow D, dn) \tag{1}$$

Dla uproszczenia rozważań założymy, że uszkodzony materiał poddany został obciążeniom cyklicznym przy stałej wartości ϕ opisującej proces zmęczenia. Założymy następnie, że względny przyrost uszkodzenia dD/D jest liniową funkcją względnego przyrostu cykli dn/n. W takim przypadku wpływ historii obciążenia $H=H(\phi)$ można przedstawić za pomocą następującej zależności

$$dD/D = H(\phi)dn/n \tag{2}$$

Ponieważ proces sumowania uszkodzeń w czasie obciążeń cyklicznych jest

procesem ciągłym, więc całkowite skumulowanie uszkodzeń wynosi

$$\int \frac{dD}{D} = \int H(\phi)\,\frac{dn}{n} \tag{3}$$

Z założenia, że w analizowanym przypadku ϕ=const wynika $H(\phi)$=const. Zatem na podstawie równania (3) otrzymamy

$$\ln D = H(\phi)\,\ln n + C \tag{4}$$

gdzie stałą całkowania C wyznaczamy z warunku, że dla $n = N_f$, $D = D_f$

$$C = \ln D_f - H(\phi)\ln N_f \tag{5}$$

Podstawiając zależność (5) do równania (4) otrzymujemy

$$\frac{D}{D_f} = \left(\frac{n}{N_f}\right)^{H(\phi)} \tag{6}$$

Wprowadzając bezwymiarową funkcję uszkodzenia $d=D/D_f$ otrzymujemy

$$d = \left(\frac{n}{N_f}\right)^{H(\phi)} \tag{7}$$

Wartość d zmienia się od d=0 dla materiału w stanie naturalnym do d=1 w chwili zniszczenia.

Jeżeli dla $\phi_1>\phi_2$ przy $n_1=n_2=n_*$ przyrost uszkodzenia d jest większy, to mówimy, że ϕ_1 jest bardziej niszczące niż ϕ_2. W takim przypadku, na podstawie zależności (7):

$$H(\phi_1,n_*) < H(\phi_2,n_*) \text{ jeżeli } \phi_1>\phi_2 \tag{8}$$

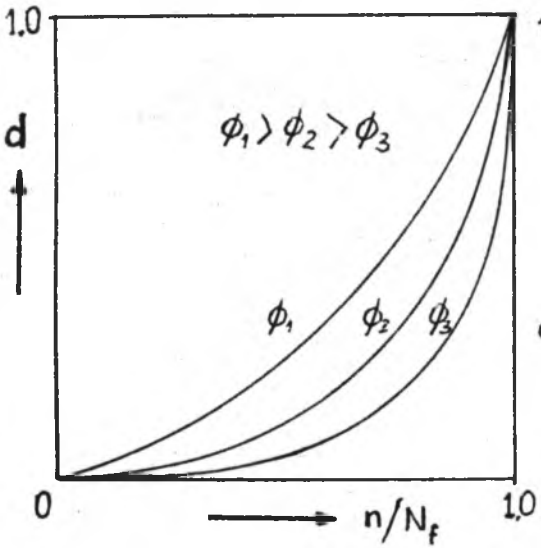
Wpływ parametru ϕ na wielkość uszkodzenia przedstawiono na rys.1.

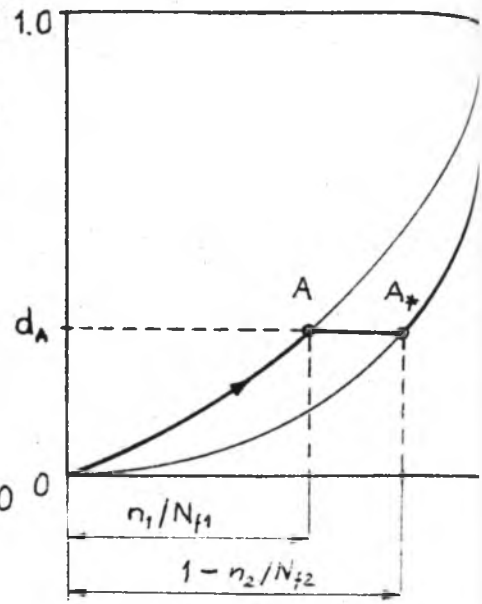
Rozpatrzymy obecnie sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych na przykładzie dwublokowej historii obciążenia. Pierwszy blok obciążenia jest zdeterminowany historią $H(\phi_1,n_1)$. Parametrowi ϕ_1 na podstawie kryterium zmęczenia odpowiada N_{f1} cykli do zniszczenia. Poziom zgromadzonego uszkodzenia w wyniku obciążenia liczbą cykli n_1 przy parametrze ϕ_1 wynosi d_A (rys.2). Następnie w drugim bloku zmieniono obciążenie do poziomu ϕ_2 (dla którego liczba cykli do zniszczenia wynosi N_{f2}) i kontynuowano obciążenie cykliczne w ciągu n_2 cykli, aż do zniszczenia próbki. W tym

czasie uszkodzenie wzrosło od $d_A = d_{A*}$ do d=1 w chwili zniszczenia (rys.2). Zatem, korzystając z zależności (7) otrzymujemy

$$\left(\frac{n_1}{N_{f1}}\right)^{H(\phi_1)} = \left(1 - \frac{n_2}{N_{f2}}\right)^{H(\phi_2)} \tag{9}$$

Po przekształceniu równania (9) otrzymujemy hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w następującej postaci





Rys. 1. Krzywa uszkodzenia

Fig. 1. Damage curve

Rys. 2. Dwublokowe obciążenie

Fig. 2. Two-block loading

$$\left(\frac{n_1}{N_{f2}}\right)^{H(\phi_1)/H(\phi_2)} + \frac{n_2}{N_{f2}} = 1 \tag{10}$$

Z zależności (10) wynika, że dla $H(\phi_1)=H(\phi_2)$ otrzymujemy liniowe prawo kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych Minera-Palmgrena [5] dla dowolnego dwublokowego obciążenia. W takim przypadku sekwencja bloków obciążenia nie jest uwzględniona przy sumowaniu uszkodzeń zmęczeniowych.

Model kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych przedstawiony powyżej może być bezpośrednio uogólniony na przypadek obciążeń z dowolną ilością bloków.

3. WNIOSKI

W pracy przedstawiono model opisujący sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych w materiale. Przedstawiony model umożliwia uwzględnienie wpływu sekwencji obciążenia na trwałość zmęczeniową.

LITERATURA

[1] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych, PWN, Warszawa 1987.

[2] Kocańda S., Kocańda A.: Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali, PWN, Warszawa 1989.

[3] Gołoś K.: Fatigue life evaluation in the conditions of stepwise loading, Budownictwo Okrętowe, nr 403, 261-266, Gdańsk 1986.

[4] Gołoś K.: Cumulative damage fatigue in St5 madium carbon steel, Proceedings of the 1st Conference on Mechanics, Vol.IV, 4/III, 111-114, Praha 1987.

[5] Miner M.A. : Cumulative damage in fatigue, Trans. ASME, J. Appl. Mech., Vol.12, A159-A164, 1954.

MODELING OF CUMULATIVE FATIGUE DAMAGE

A problem of the cumulative damage is analyzed which accounts for the previous damage history and loading order effect. The dimensionless damage is specified in terms of damage history, $H(\phi,n)$, in the form

$$d = \left(\frac{n}{N_f}\right)^{H(\phi)}$$

where ϕ is a controlling damage parameter and n is a number of cycles applied at ϕ. Subsequently, the nonlinear cumulative damage model is investigated.

This nonlinear cumulative damage model is based on the phenomenological

approach which relates the rate of damage to that of cyclic loading through the damage function.

As the result following damage rule for two-block loading is presented

$$\left(\frac{n_1}{N_{f2}}\right)^{H(\phi_1)/H(\phi_2)} + \frac{n_2}{N_{f2}} = 1$$

The effect of loading history is included in this approach.