

SYMPOZJON "MODELOWANIE W MECHANICE"
POLSKIE TOWARZYSTWO MECHANIKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ
Beskid Śląski, 1990

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

MODEL KUMULACJI USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH PRZY STOPNIOWANYCH OBCIĄŻENIACH

Streszczenie. W pracy przedstawiono model kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. W rozważaniach wykorzystano energetyczne kryterium zmęczenia. Przedstawiona zasada uwzględnia wpływ sekwencji obciążenia oraz pewne uszkodzenia od obciążeń poniżej granicy zmęczenia.

1. Wprowadzenie

Elementy maszyn dość często poddane są cyklicznym stopniowanym ("schodkowym") przebiegom naprężeń. Tego rodzaju przebiegi naprężeń często też określa się mianem przebiegów nieregularnych, sinusoidalnie zmiennych. Różne wartości historii obciążenia wyrażone za pomocą funkcji naprężenia σ_i i odkształcenia ϵ_i w różnych blokach i działających przez n_i liczbę cykli w widmie powodują różny stopień zmęczeniowego uszkodzenia elementu. Konieczność ujęcia w obliczeniach zasięgu i skutków uszkodzeń zmusiła badaczy do poszukiwań miary tych uszkodzeń [1-6].

2. Zasada kumulacji uszkodzeń

W pracy zaprezentowano hipotezę gromadzenia się lub inaczej sumowania albo kumulacji uszkodzeń, w której za parametr uszkodzenia przyjęto gęstość energii odkształcenia [2,3]. W rozważaniach krzywą nieliniową trwałości zmęczeniowej zaaprosymowano dwiema zależnościami (Rys.1)

$$\Delta W^t = K N_f^\alpha \quad \text{dla } N_f < N_o, \quad (1a)$$

$$\Delta W^t = C \quad \text{dla } N_f > N_o. \quad (1b)$$

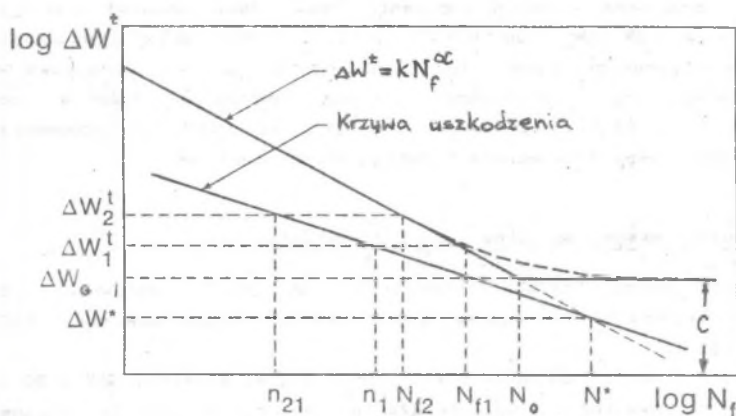
W analizie problemu kumulacji uszkodzeń uwzględniono obie fazy zmęczenia materiału, tj. etap inicjacji obejmujący N_i oraz etap propagacji, obejmujący $N_p = N_f - N_i$. W literaturze z mechaniki pęknięcia podano wiele propozycji określania granicy pomiędzy obiema fazami. W podejściach tych najczęściej definiuje się dość arbitralnie wielkość krytycznej długości szczeliny l_o , powstanie której zapoczątkowuje proces rozwoju pęknięcia. W prezentowanej metodzie granicę pomiędzy fazą inicjacji i propagacji przedstawiono za pomocą tzw. krytycznej krzywej uszkodzenia. Założono, że krytyczna krzywa uszkodzenia może być wyrażona za pomocą krzywej Frencha. Wielkość uszkodzenia materiału może być określona poprzez redukcję granicy zmęczenia lub za pomocą krytycznej wielkości pęknięcia. Oba te podejścia są równoważne, gdyż granica zmęczenia oraz wielkość krytycznego pęknięcia są ze sobą powiązane. W analizie założono, że dla fazy rozwoju pęknięcia, materiał posiada zredukowaną granicę zmęczenia określaną za pomocą ΔW^* lub N^* . Wartość N^* może być wyznaczona w oparciu o mechanikę pęknięcia lub z badań doświadczalnych jako punkt wspólny przecięcia stycznej do krzywej trwałości ze styczną do krytycznej krzywej uszkodzenia (Rys.1).

Rozważmy próbkę poddaną dwustopniowej historii obciążenia. Niech gęstość energii odkształcenia w pierwszym bloku, obejmującym n_1 cykli, wynosi ΔW_1^t . Równanie krzywej uszkodzenia w tym stopniu opisano zależnością:

$$\frac{\Delta W_1^t}{\Delta W^*} = \left(\frac{n_1}{N_{f1}} \right)^\zeta, \quad (2)$$

gdzie ζ jest parametrem dla danej krzywej zniszczenia. Wielkość ζ dla pierwszego bloku obciążenia wynosi:

$$\zeta = \frac{\log(\Delta W_1^t / \Delta W^*)}{\log(n_1 / N^*)} \quad (3)$$



Rys. 1

W drugim stopniu obciążenia gęstość energii odkształcenia zmienia się na ΔW_2^t . Zastosowanie n_1 cykli przy ΔW_1^t spowodowało zgromadzenie pewnego uszkodzenia w materiale. Wielkość tego podwyższenia określono za pomocą ekwiwalentnej liczby cykli n_{21} przy wartości parametru obciążenia ΔW_2^t . Wielkość n_{21} opisuje zależność:

$$n_{21} = N^* \left[\frac{n_1}{N^*} \right]^{\frac{\log(\Delta W_2^t / \Delta W^*)}{\log(\Delta W_1^t / \Delta W^*)}} \quad (4)$$

Innymi słowy n_{21} cykli obciążenia przy wartości parametru uszkodzenia ΔW_2^t powoduje ten sam efekt co n_1 cykli przy wartości parametru uszkodzenia ΔW_1^t . W przypadku dwustopniowej historii obciążenia

$$n_{21} + n_2 = N_{f2} \quad (5)$$

gdzie N_{f2} jest liczbą cykli do zniszczenia przy ΔW_2^t , a n_2 jest maksymalną liczbą cykli, jaką można zastosować w drugim stopniu.

Wstawiając (4) do (5) oraz przekształcając otrzymuje się zasadę kumulacji uszkodzeń dla dwustopniowej historii obciążenia

w postaci:

$$\left(\frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\frac{\log(\Delta W_2^t / \Delta W^*)}{\log(\Delta W_1^t / \Delta W^*)}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = 1 \quad (6)$$

Gdy zredukowana granica zmęczenia jest równa umownej granicy zmęczenia ($\Delta W^* = \Delta W_0$ lub $N^* = N_0$), otrzymuje się prawo kumulacji uszkodzeń przedstawione przez Hashina i Rotema [4]. Dodatkowo w przypadku, gdy zredukowana granica zmęczenia zmierza do nieskończoności, otrzymuje się liniową hipotezę sumowania uszkodzeń, zwaną powszechnie hipotezą Palmgren-Minera.

3. Badania eksperymentalne i analiza wyników

Zaproponowaną zasadę kumulacji uszkodzeń porównano z zamieszczonymi w literaturze danymi doświadczalnymi dla stali SAE 4130 [5,6].

Manson i współpracownicy [5,6] badali próbki ze stali SAE 4130 w warunkach dwustopniowego obciążenia. Na rys.2 zostały podane wyniki doświadczalne oraz krzywe analityczne przedstawiające ocenę trwałości materiału w oparciu o przedstawioną zasadę kumulacji uszkodzeń. Jak widać, uzyskano dla stali SAE 4130 we wszystkich przypadkach dobrą zgodność wyników doświadczalnych i analitycznych.

4. Wnioski

W pracy przedstawiono energetyczny model kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Wyniki uzyskane na podstawie przedstawionego modelu porównano z danymi doświadczalnymi przedstawionymi w literaturze dla stali SAE 4130. W analizowanych przypadkach stwierdzono dobrą zgodność wyników teoretycznych i analitycznych.

LITERATURA

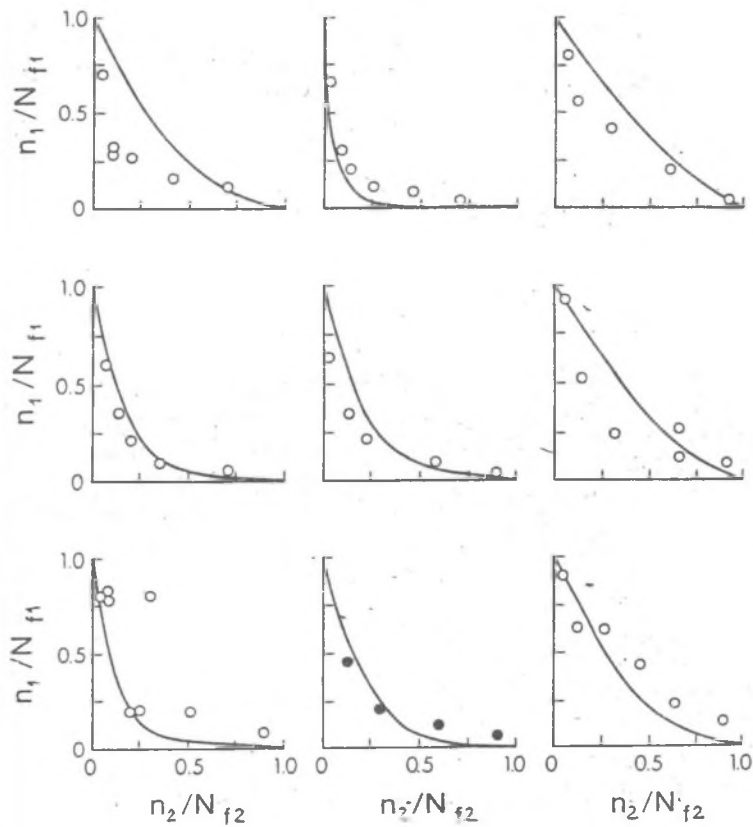
- [1] Kocańda, S., Szala, J.; Podstawy obliczeń zmęczeniowych, PWN, Warszawa 1985.
- [2] Gołoś, K.; Energetic formulation of fatigue strength criterion, Archiwum Budowy Maszyn, Vol.36, 5-16, 1988.

Eksperyment [3,6]

○ SAE 4130 stal "mięka"

● SAE 4130 stal "twarda"

— równanie (6)



Rys. 2

- [3] Gołóś, K.; Cumulative Damage Fatigue in St5 - Medium Carbon Steel, Proceedings of the 1st Conference on Mechanics, Praha, Tom IV, 4/III, 111-114, 1987.
- [4] Hashin, Z., Rotem, A.; A cumulative damage theory of fatigue. Materials Scien. Engng., Vol.34, 147-160, 1978.
- [5] Manson, S.; Fatigue: a complex subject - some approximations. Experimental Mechanics, Vol.5, 193-226, 1965.
- [6] Manson, S., et al.; Further investigation of a relation for cumulative fatigue damage in bending, J. of Engng. for Industry, Trans. ASME, Vol.87, No1, 25-35, 1965.

МОДЕЛЬ КУМУЛЯЦИИ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ
ПРИ СТУПЕНЧАТЫХ НАГРУЗКАХ

Резюме

В работе представлена модель кумуляции усталостных повреждений. При рассуждениях использовался энергетический критерий усталости. Представленный принцип учитывает влияние последовательности нагрузок, а также учитывает некоторые повреждения возникшие от нагрузок превышающих границу усталости.

MODEL OF CUMULATIVE FATIGUE DAMAGE IN STEPWISE LOADING

Summary

A cumulative damage rule for stepwise loading has been presented. In the analysis the energetic fatigue criterion has been used. The model is sensitive to sequence of loading and includes some damage due to cyclic loading below fatigue limit. The comparison of predicted results with experimental data for SAE 4130 steel has shown good agreement.