

MODELOWANIE WPŁYWU NIESYMETRYCZNYCH DWU-BLOKOWYCH OBCIĄŻEŃ NA KUMULACJĘ USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH W STALI EN295

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych przy cyklicznych dwu-blokowych sekwencjach obciążenia dla cykli symetrycznych i z dodatnim odkształceniem średnim cyklu dla stali En 295. Do analizy danych doświadczalnych oprócz liniowej hipotezy Palmgrena-Minera została wykorzystana również hipoteza Gołosia-Ellyina. Porównanie wyników doświadczalnych i analitycznych wykazało dość dobrą zgodność.

WSTĘP

Projektowanie trwałości elementów konstrukcji w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych wymaga, oprócz znajomości kryterium zmęczeniowego, także analizy rozwoju uszkodzenia materiału tych elementów, czyli kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych.

Na ogół przyjmuje się, że uszkodzenie zmęczeniowe wzrasta w elemencie wraz z liczbą cykli obciążenia. Jako miarę uszkodzenia zmęczeniowego często przyjmowany jest stosunek liczby cykli w danym bloku obciążenia o danej amplitudzie naprężenia/odkształcenia n_i do liczby cykli odpowiadającej zniszczeniu przy danej amplitudzie obciążenia/odkształcenia N_{fi} . W literaturze między innymi w pracach Mansona i Halford [1], Fatemi i Yang [2], Szali [3], odnotowano wiele hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Jedną z pierwszych hipotez, do dzisiaj często stosowaną, jest zasada liniowej kumulacji uszkodzenia (LDR) zaproponowana przez Palmgrena-Minera [4,5]. Zasada ta prowadzi do liniowego sumowania uszkodzeń w poszczególnych blokach. Matematycznie LDR można wyrazić jako:

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi}} = 1 \quad (1)$$

gdzie:

n_i – liczba cykli o danej amplitudzie naprężenia/odkształcenia w i -tym bloku,

N_{fi} – liczba cykli do zniszczenia przy danej amplitudzie naprężenia/odkształcenia.

Głównymi mankamentami LDR są jej niezależność od sekwencji obciążenia i brak możliwości uwzględnienia obciążeń z amplitudami naprężenia poniżej granicy zmęczenia na kumulację uszkodzeń. Badania doświadczalne pokazują, że może to prowadzić do pewnych niedokładności w szacowaniu trwałości elementów. Dane eksperymentalne przedstawione w literaturze akcentują istotny wpływ sekwencji obciążenia zmęczeniowego na sumowanie uszkodzeń. Przy dwustopniowym blokowym obciążeniu z rosnącą amplitudą naprężenia/odkształcenia w blokach (sekwencja L-H), w części badanych stali zaobserwowano, że $\sum n_i / N_{fi} > 1$. Natomiast przy odwróconej sekwencji obciążenia w blokach (H-L) otrzymana doświadczalnie wartości $\sum n_i / N_{fi} < 1$.

W kontekście tych obserwacji, w literaturze przedstawiono nieliniowe hipotezy kumulacji uszkodzeń. W analizie zostanie wykorzystane hipoteza kumulacji uszkodzenia przedstawiona przez Gołosia

i Ellyina [6-8]. Zgodnie z tą hipotezą za parametr uszkodzenia przyjęto gęstość energii odkształcenia, równą sumą gęstości energii odkształcenia plastycznego i gęstości energii odkształcenia sprężystego w półcyklu rozciągania. Ten parametr wykorzystano do opracowania kryterium trwałości zmęczeniowej w jednoosiowym cyklicznym stanie obciążenia i następnie do opracowania hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Podejście to umożliwia ocenić resztkową wytrzymałość zmęczeniową materiału, gdy jest on poddawany określonej sekwencji bloków cyklicznych obciążenia. Hipoteza ta uwzględnia wpływ sekwencji obciążenia (H-L, L-H) na sumowanie uszkodzeń, asymetrię cyklu w bloku a także wpływ obciążeń poniżej granicy zmęczenia.

Celem artykułu jest analiza wyników badań eksperymentalnych wpływu średniego odkształcenia/naprężenia cyklu [9-11] w dwublokowych sekwencjach obciążenia na kumulację uszkodzeń zmęczeniowych w stali EN295. Badane prowadzono przy dwublokowych (L-H) i (H-L) sekwencjach obciążenia. W analizie otrzymanych wyników doświadczalnych użyto liniowej zasady kumulacji uszkodzeń Palmgrena-Minera oraz nieliniowej hipotezy Gołosia-Ellyina.

1. KRYTERIUM TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Ponieważ uszkodzenie zmęczeniowe są zazwyczaj spowodowane przez powstawanie i rozwój odkształcenia plastycznego, zatem postuluje się, że rozproszona gęstość energii odkształcenia plastycznego odgrywa ważną rolę w procesie zmęczenia. Jednakże, gdy liczba cykli dąży do nieskończoności, wartość zakresu plastycznego odkształcenia również maleje, zatem i gęstość energii odkształcenia plastycznego dąży do zera. Dlatego opisy zmęczenia wysoko- cyklowego bazujące wyłącznie na analizie gęstości energii odkształcenia plastycznego mogą prowadzić do niedokładności. W celu ujednoczenia opisu trwałości zmęczeniowej (kryterium zmęczenia) w zakresie nisko- i wysoko- cyklowego zmęczenia za parametr zniszczenia w pracach zaproponowano gęstość energii

odkształcenia całkowitego oznaczony przez ΔW^t równą sumie gęstości energii odkształcenia plastycznego oraz gęstości odkształcenia sprężystego w półcyklu rozciągania. Parametr ten może być wyrażony jak:

$$\Delta W^t = \frac{1 - n'}{1 + n'} \Delta \sigma \Delta \varepsilon^p + \frac{(\Delta \sigma / 2 + \sigma_m)^2}{E} \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta\sigma$ – zakres naprężenia w cyklu w i-tym bloku,

$\Delta\varepsilon^p$ – zakres odkształcenia plastycznego w cyklu w i-tym bloku,

σ_m – naprężenie (odkształcenie) średnie cyklu,

E- moduł Younga,

n' – wykładnik cyklicznej krzywej odkształcenia.

Krzywa (kryterium) trwałości zmęczeniowej w ujęciu energetycznym wyrażono jako:

$$\Delta W^t = k(N_f)^\alpha + C \quad (3)$$

gdzie:

N_f –liczba cykli do zniszczenia przy danej amplitudzie naprężenia/odkształcenia,

k – współczynnik krzywej kryterium trwałości/

α – wykładnik krzywej kryterium trwałości,

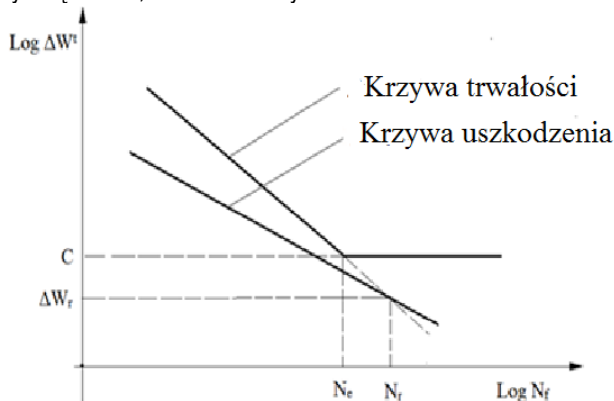
C- parametr odpowiadający granicy zmęczenia.

krzywą można zaprosymować 2 zależnościami (Rys.1):

$$\begin{aligned} \Delta W^t &= k(N_f)^\alpha && \text{when } N_{fi} < N_e \\ \Delta W^t &= C && \text{when } N_{fi} > N_e \end{aligned} \quad (4)$$

2. KRYTERIUM TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

W rozważaniach przyjęto następujące założenia : (a) Dla fazy propagacji pęknięcia materiał ma granicę zmęczenia określoną przez $\Delta W_e = C$. (b) Dla fazy inicjacji pęknięcia materiał ma „zredukowaną granicę zmęczenia”, zdefiniowaną przez ΔW_r i liczbę cykli N_r , gdzie N_r wyznaczamy jako punkt przecięcia krzywej $\Delta W^t - N_r$ i granicznej krzywej uszkodzenia (determinującej rozdział fazy inicjacji pęknięcia i propagacji). (c) Krzywą zmęczenia i graniczną krzywą uszkodzenia można aproksymować w układzie $\text{Log } \Delta W^t - \text{Log } N_r$ za pomocą linii prostych (Rys.1). Proste te dążą do punktu opisującego granicę (N_e, C) dla fazy propagacji i do punktu $(N_r, \Delta W_r)$ dla fazy inicjacji. Dodatkowo przyjęto uproszczenie, że wartość gęstości energii odkształcenia całkowitego dla zredukowanej granicy zmęczenia, ΔW_r obliczamy dla $N_r = 2N_e$.



Rys.1 Krzywa trwałości zmęczeniowej i graniczna krzywa uszkodzenia.

Rozważmy dwublokową sekwencję obciążenia. Niech pierwszy blok będzie scharakteryzowany przez parametr uszkodzenia ΔW^t_1 i liczbę cykli obciążenia w bloku n_1

Aktualna krzywa uszkodzenia może opisana zależnością

$$\frac{\Delta W^t_1}{\Delta W_r} = \left(\frac{n_1}{N_{f1}}\right)^\zeta \quad (5)$$

gdzie:

ζ – współczynnik krzywej uszkodzenia .

W drugim bloku obciążenia zmieniamy obciążenie/odkształcenia scharakteryzowane za pomocą parametru zniszczenia ΔW^t_2 i kontynuujemy obciążenie cykliczne do utraty spójności materiału.

Aplikacja w pierwszym bloku obciążenia n_1 cykli przy wartości parametru zniszczenia ΔW^t_1 spowodowało degradację właściwości materiału, a wielkość tego uszkodzenia może być określona na podstawie krzywej uszkodzenia. Znajdziemy zastępczą liczbę cykli n_{12} scharakteryzowana parametrem zniszczenia dla drugiego bloku ΔW^t_2 , przy której podniszczenie będzie równoważne degradacji w pierwszym bloku:

$$n_{12} = N_r \left(\frac{n_1}{N_r}\right)^{\frac{\log(\Delta W^t_2 / \Delta W_r)}{\log(\Delta W^t_1 / \Delta W_r)}} \quad (6)$$

Uwzględniając, że:

$$n_2 = N_{f2} - n_{12} \quad (7)$$

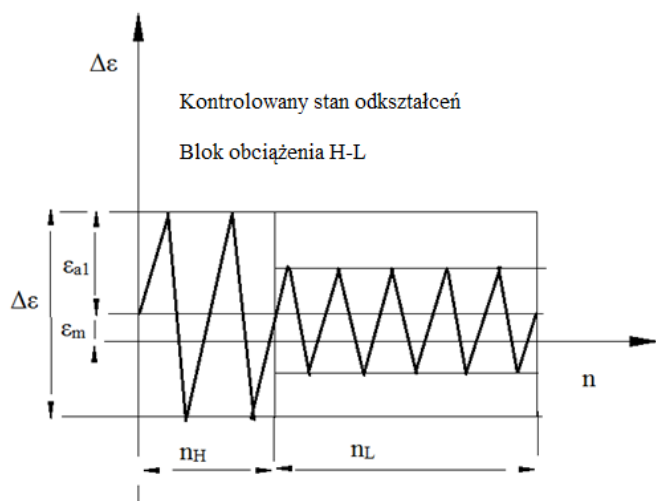
otrzymujemy wyrażenie opisujące hipotezę kumulacji uszkodzeń , przy dwublokowych sekwencjach, w następującej postaci:

$$\left(\frac{n_1}{N_{f1}}\right)^{\frac{\log(\Delta W^t_2 / \Delta W_r)}{\log(\Delta W^t_1 / \Delta W_r)}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = 1 \quad (8)$$

Można zauważyć, że dla wzrastających wartości “zredukowanej granicy zmęczenia” równanie (8) redukuje się do zależności (1) wyrażającej opis zasady liniowego sumowania uszkodzeń LDR zaproponowanej przez Palmgren - Minera. Także w przypadku kiedy krzywa trwałości zmęczeniowej i graniczna krzywa uszkodzenia pokrywają się, to znaczy w procesie zmęczenia decyduje faza inicjacji, otrzymuje się też zależność wyrażającą LDR.

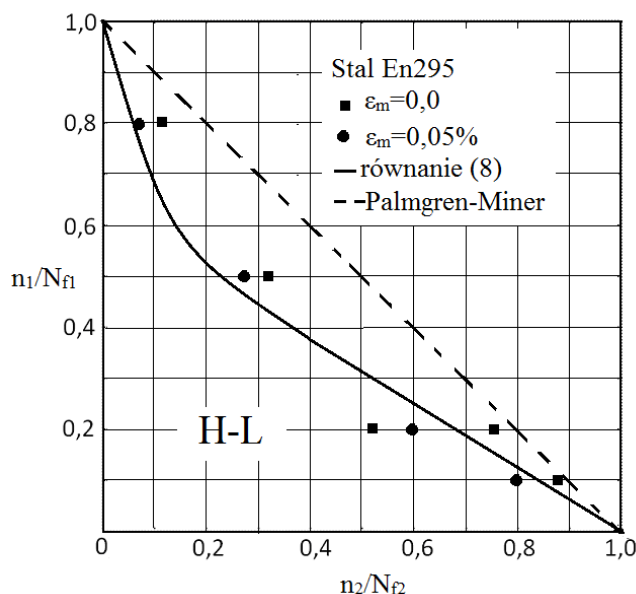
3. BADANIA DOŚWIADCZALNE. ANALIZA WYNIKÓW

Badania doświadczalne przeprowadzono dla niesymetrycznych dwublokowych sekwencji obciążenia H-L i L-H, z występującym odkształceniem średnim cyklu. (Rys.2).

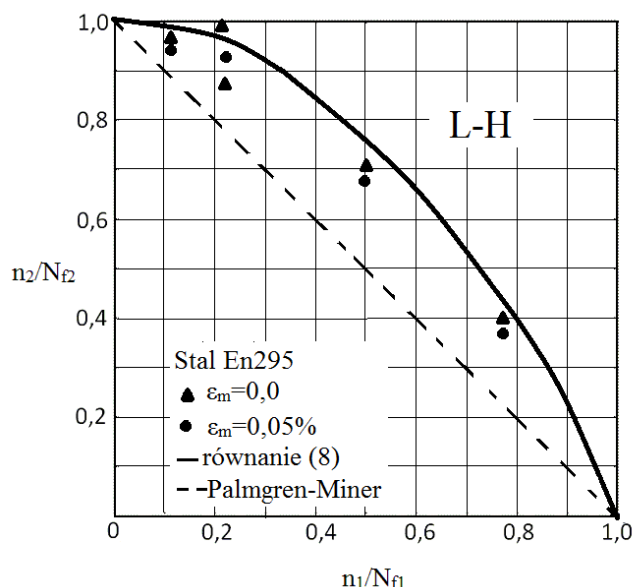


Rys.2 Niesymetryczna dwublokowa H-L sekwencja obciążenia.

Badania przeprowadzono na próbkach o przekroju kołowym wykonanym ze stali En295. W pierwszej części badań wyznaczono krzywą trwałości zmęczeniowej. Badania prowadzono przy kontrolowanym stanie odkształcenia, zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie PN-84/H-04334. Na podstawie uzyskanych wyników doświadczalnych wyznaczono wartość parametru zniszczenia, gęstość energii odkształcenia całkowitego, dla zredukowanej granicy zmęczenia $\Delta W_r = 0,03 \text{ MJ/m}^3$. Następnie w warunkach kontrolowanego stanu odkształcenia ($\Delta\epsilon = \text{const.}$) przeprowadzono badania kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych przy obciążeniach blokowych. Badania prowadzono w temperaturze pokojowej przy częstotliwości obciążenia $f=0,2\text{Hz}$. Wartości amplitud całkowitego odkształcenia ($\Delta\epsilon/2$), wyniosły dla bloku z wyższą amplitudą (H) $\epsilon_{a1} = 0,65\%$ i dla bloku z niższą amplitudą (L) $\epsilon_{a2}=0,065\%$. Odpowiadające wartości parametru zniszczenia w blokach H i L wyniosły odpowiednio $\Delta W_1^t \text{ (H)} = 12,2 \text{ MJ/m}^3$ i $\Delta W_2^t \text{ (L)} = 0,68 \text{ MJ/m}^3$. Z krzywej trwałości dla wybranych analizowanych poziomów amplitud odkształcenia, otrzymano liczby cykli do zniszczenia $N_{FH} = 701$ cykli i $N_{FL} = 50\ 201$ cykli. Następnie, zbadano wpływ odkształcenia średniego cyklu na proces kumulacji uszkodzeń przy dwublokowych sekwencjach obciążenia, H-L i L-H. Dla obu sekwencji obciążenia w obu blokach wartość dodatniego odkształcenia średniego wynosiła $\epsilon_m = 0.005\%$. Badania prowadzono przy czterech wartościach poziomów podniszczenia, opisanych przez stosunek n_i/N_{Fi} . Wyniki badań dla obu sekwencji obciążenia dla cykli wahadłowych i z występującym odkształceniem średnim przedstawiono na rys.3-4. Zaobserwowano znaczący wpływ sekwencji obciążenia na kumulację uszkodzeń zmęczeniowych. Dla sekwencji obciążenia w blokach (H-L) otrzymano doświadczalnie wartości $\sum n_i / N_{Fi}$ w zakresie od 0,65 do 0,94. Natomiast przy odwróconej sekwencji obciążenia w blokach (L-H) otrzymano doświadczalnie wartości $\sum n_i / N_{Fi}$ w zakresie od 1,02 do 1,25. Dla obciążeń z występującym dodatnim odkształceniem średnim, otrzymano zmniejszenie trwałości zmęczeniowej w porównaniu do testów symetrycznych. Do analizy danych doświadczalnych oprócz liniowej hipotezy Palmgren-Minera użyto też hipotezy przedstawionej przez Gołosia i Ellyina. Porównanie pokazało dość dobrą zgodność wyników analitycznych uzyskanych na podstawie analizowanej hipotezy z wynikami doświadczalnymi.



Rys.3 Porównanie wyników doświadczalnych dla sekwencji H-L i uzyskanych na podstawie hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych.



Rys.4 Porównanie wyników doświadczalnych dla sekwencji L-H i uzyskanych na podstawie hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych.

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych przy cyklicznych dwu-blokowych sekwencjach obciążenia dla cykli symetrycznych i z dodatnim odkształceniem średnim cyklu dla stali En 295. Badania wykazały istotny wpływ sekwencji obciążenia na proces kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych dla badanej stali. W sekwencji malejących wartości obciążenia w danym bloku (H-L) sumowana liniowo miara kumulacji wyrażona jako $\sum n_i / N_{Fi}$, była w zakresie od 0,65 do 0,94. W przypadku odwróconej kolejności bloków (L-H) sumowana liniowo miara kumulacji wyrażona jako $\sum n_i / N_{Fi}$, była w zakresie od 1,02 do 1,25.

Do analizy danych doświadczalnych oprócz liniowej hipotezy Palmgren-Minera użyto też hipotezy przedstawionej przez Gołosia i Ellyina. Przewidywania oparte na analizowanej hipotezie dla badanych sekwencji obciążenia, dla stali En295 w porównaniu z uzyskanymi danymi eksperymentalnymi wykazały dobrą zgodność.

BIBLIOGRAFIA

1. Manson, S. S. , Holford, G. R., Practical implementation of the double linear rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage. *Int. J. Fract.*, 17(2) (1981) 169-92.
2. Fatemi, A., Yang, L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials, *Int. J. Fatigue*, Vol.20 (1998), 9-34.
3. Kocaniada, S., Szala, J., Podstawy obliczeń zmęczeniowych, PWN, Warszawa.
4. Palmgren, A. Z., Endurance of ball bearings. *Ver. Deutsch Ing.*, 68 (1942) 339-341.
5. Miner, M. A., Cumulative damage in fatigue. *J. Appl. Mech. trans. ASME*, 12 (1945) A159-A164.
6. Golos, K., Energetic formulation of fatigue strength criterion. *Archiwum Budowy Maszyn*, 25(1/2) (1988) 5-16.
7. Golos, K., Multiaxial energy based fatigue criterion, *Engineering Transactions*, vol.36, nr 1., (1988), 55-63
8. Golos, K., Ellyin, F., A total strain energy theory for cumulative fatigue damage, *Transactions ASME. Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.110, (1988), 35-41.
9. Ellyin, F. "Effect of tensile-mean-strain on plastic strain energy and cyclic response." *Journal of Engineering Materials and Technology* 107.2 (1985): 119-125.
10. Ohji, K., Miller, W. R., & Marin, J. (1966). Cumulative damage and effect of mean strain in low-cycle fatigue of a 2024-T351 aluminum alloy. *Journal of Fluids Engineering*, 88(4), 801-810.
11. Yip, Ming-Chuen, and Yi-Ming Jen. "Mean strain effect on crack initiation lives for notched specimens under biaxial nonproportional loading paths." *Journal of engineering materials and technology* 119.1 (1997): 104-112.

agreement.

Autorzy:

Prof. dr hab. inż. **Krzysztof Gołoś** – Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych ; 02-524 Warszawa; ul. Narbutta 84; Tel:+ 48 234-82-62, kgo@simr.pw.edu.pl , Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, ul.Racjonalizacji 6/8, 02-673 Warszawa

Anna Gołoś – Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, 02-525 Warszawa; ul. A .Boboli 8

ANALYSIS OF NON-SYMMETRICAL TWO BLOCK LOADING INFLUENCE ON CUMULATIVE FATIGUE DAMAGE IN STEEL EN295

Abstract

The results of experimental studies of fatigue damage accumulation at the cyclic two-block sequence loading for steel En295 have been presented. Studies have shown load sequence effect on fatigue damage accumulation process for the test steel. In the descending load values in a block (H-L) summed linearly measure of accumulation was in the range of 0,65 to 0.94. If the reverse order of blocks (L-H) linearly summed measure of the accumulation ranged from 1.02 to 1.25. Positive mean strain generally decreases the fatigue life. For the analysis of experimental data in addition to the linear hypothesis Palmgren-Miner has been used a hypothesis put forward by Golos and Ellyin.

Predictions based on the analyzed hypothesis for the analyzed test load sequence for symmetrical and with mean strain cycles for steel specimen En295 compared with the data obtained showed good