

Józef SZALA, Bogdan LIGAJ, Grzegorz SZALA

ŹRÓDŁA RÓŻNIC W WYNIKACH OBLICZEŃ I BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH

Streszczenie. Podstawę oceny trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w procesie projektowo-konstrukcyjnym stanowią wyniki obliczeń. Powyższe wynika z faktu, że w tej fazie istnienia wytworu brak materialnych obiektów badań. Ważnym elementem w obliczeniowej ocenie trwałości jest wiarygodność wyników obliczeń trwałości, którą można ocenić z porównania tych wyników z wynikami badań doświadczalnych. W artykule dokonano analizy wybranych czynników istotnie wpływających na zgodność wyników obliczeń i badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej, związanych z podstawowymi elementami algorytmu obliczeń, obejmujących:

- opracowanie i analizę obciążeń eksploatacyjnych elementu konstrukcyjnego,
- wyznaczenie i analizę własności cyklicznych materiałów konstrukcyjnych,
- dobór hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, stanowiącej fenomenologiczny opis procesu zmęczenia.

Wymienioną analizę zilustrowano przykładami z badań zmęczeniowych zrealizowanych w Zakładzie Podstaw Konstrukcji Maszyn Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy w ramach projektu badań własnych nr 2221/B/T02/2010/39 finansowanego przez MNiSW oraz NCN.

Słowa kluczowe: trwałość zmęczeniowa, wytrzymałość materiałów, badania doświadczalne, stal, aluminium

SOURCES OF DIFFERENCES IN CALCULATIONS AND EXPERIMENTAL TEST RESULTS OF FATIGUE LIFE OF STRUCTURAL ELEMENTS

Summary. Calculation results are the base for evaluation of fatigue life of structural elements during machine design processes. It results from the fact that there are no material objects in the phase of existence of a product. Reliability of tests results is an essential element in the calculation fatigue life evaluation method and it can be evaluated by comparison of the results with experimental ones. In the paper there was performed an analysis of the chosen factors essentially influencing conformity of calculation results and experimental test ones connected with basic elements of a calculation algorithm including:

- elaboration and analysis of service loadings of a structural element,
- determination and analysis of cyclic properties of structural elements,
- selection of fatigue damage accumulation hypothesis being a description of fatigue life processes.

The mentioned analysis was illustrated with examples of fatigue life tests performed in the Machine Design Department of the University of Technology and Agriculture within the research grant no. 2221/B/T02/2010/39 financed by The Ministry of Science and Higher Education and National Science Centre.

Keywords: fatigue life, strength of materials, experimental tests, steel, aluminium

1. WPROWADZENIE

Złożoność procesu zmęczenia materiałów i zmęczeniowego pękania elementów konstrukcyjnych sprawia, że dotychczas, mimo wielu badań naukowych, dominują metody oparte na zastosowaniu hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych [1]. Obliczenia te wymagają, jak wiadomo, znajomości obciążeń eksploatacyjnych elementu konstrukcyjnego, własności cyklicznych materiału, z którego wykonany jest element, oraz doboru odpowiedniej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

Pierwsza grupa czynników istotnie wpływających na zgodność wyników obliczeń i badań trwałości zmęczeniowej jest związana z obciążeniem zmiennym (zmęczeniowym) elementu konstrukcyjnego.

Obciążenia eksploatacyjne mają charakter procesów losowych i wymagają zastosowania odpowiednich metod opracowania w celu wyznaczenia tzw. widm obciążeń [2]. Widma te stanowią zbiór cykli sinusoidalnych o zmiennych parametrach i różnej postaci. O zmęczeniu materiałów i zmęczeniowym pękaniu elementów konstrukcyjnych decyduje przebieg zmiennych naprężeń lub odkształceń w obszarach ich koncentracji [3].

Drugą grupę czynników mających wpływ na zgodność wyników obliczeń i badań stanowią czynniki związane z wyznaczeniem i opisem własności cyklicznych materiałów, z których są wykonane analizowane elementy konstrukcyjne. Metodom wyznaczania własności cyklicznych materiałów poświęcono wiele monografii książkowych, np. [4], oraz odpowiednie normy. Własności te zwykle są opisywane wykresami zmęczeniowymi w ujęciu: naprężeniowym (wykresy Wöhlera), odkształceniowym (wykresy Mansona-Coffina oraz Ramberga-Osgooda) lub energetycznym.

Podstawowy wpływ na omawianą zgodność wyników obliczeń z wynikami badań trwałości zmęczeniowej ma przyjęcie odpowiedniej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych [1]. Praktyczne zastosowanie w obliczeniach konstrukcyjnych mają hipotezy fenomenologiczne. Z literatury znanych jest ponad 30 różnego rodzaju hipotez, w różnym stopniu doświadczalnie zweryfikowanych. Do najszerzej zweryfikowanych hipotez należą hipotezy liniowe.

Wpływ wymienionych grup czynników zostanie omówiony w skrócie w następnych punktach pracy. Dane zamieszczone w tych opisach zaczerpnięto głównie z badań własnych autorów referatu, a przede wszystkim z wykonanych w ramach projektu badań własnych nr 2221/B/T02/2010/39.

2. WPLYW CZYNNIKÓW ZWIĄZANYCH Z EKSPLOATACYJNYMI OBCIĄŻENIAMI

Znanych jest kilka metod tzw. zliczania cykli oraz dalszych kilkunastu ich modyfikacji. Do metod o szerszym zakresie zastosowań praktycznych zalicza się [4]: metodę zliczania lokalnych ekstremów (peak counting method – PCM), metodę zliczania rozpiętości gałęzi

(simple-range counting method – RCM), metodę zliczania pełnych cykli (full cycles counting method – FCM), metodę zliczania par zakresów (range-pair counting method – RPM) oraz metodę kropli deszczu (rain flow counting method – RFM).

Jak wykazano w pracy [5], widma opracowane według wymienionych metod różnią się istotnie, co ma znaczny wpływ na wynik obliczeń trwałości zmęczeniowej. Wpływ ten jest ponadto zależny od charakteru obciążeń eksploatacyjnych – losowych, opisywanego funkcją gęstości mocy (charakterystyka szerokości widma), poziomu obciążenia i rodzaju materiału. Szerokość widma w uproszczeniu opisuje się wskaźnikiem $I = N_0/N_1$ (gdzie: N_0 – liczba przecięć przez wykres obciążeń poziomu średniego, N_1 – liczba lokalnych ekstremów). W badaniach doświadczalnych opisanych w pracy [4] wykazano, że różnice w trwałości zmęczeniowej obliczeniowej w zależności od zastosowanej metody zliczania cykli i doświadczalnej wynosiły:

- dla elementów stalowych i $I = 0,56$ – ponad 30 razy,
- dla stopu aluminium 2024 i $I = 0,75$ – ponad 7 razy,
- dla stali i $I = 0,88$ – ponad 5 razy.

Z przykładów szczegółowej analizy przedstawionej w pracy [5] wynika, że różnice pomiędzy wynikami obliczeń z zastosowaniem poszczególnych metod zależą od wartości współczynnika I . Badania weryfikacyjne i symulacje obliczeniowe wykonano dla obciążeń zwrotnicy samochodu osobowego w zróżnicowanych warunkach eksploatacji. Porównanie wyników obliczeń według poszczególnych metod zliczania cykli zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Względna trwałość obliczona z zastosowaniem różnych metod zliczania cykli w zależności od wartości współczynnika I

Metoda zliczania cykli	Współczynnik szerokości widma I					
	0,8411	0,7588	0,7003	0,4455	0,3828	0,2570
PCM	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
RCM	11,3	9,5	7,0	3,5	20,6	129,4
FCM	2,9	2,4	3,0	3,5	3,3	19,0
RPM	2,7	2,2	3,1	1,6	2,8	13,2
RFM	6,4	5,6	7,0	5,2	5,6	62,7

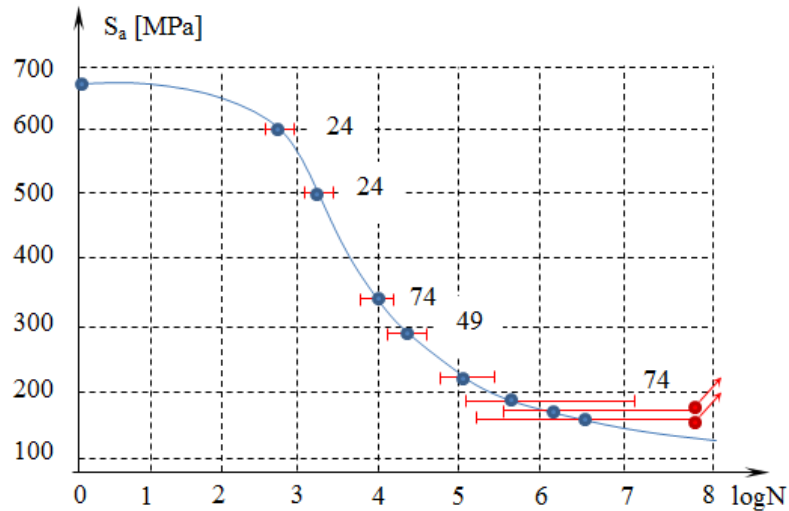
Z danych zamieszczonych w tabeli 1 wynika, że silny wpływ na wynik obliczeń według analizowanych metod ma szerokość widma eksploatacyjnego. W granicznych przypadkach dla $I = 0,2570$ różnice te sięgają wartości około 130 dla metody RCM. Weryfikacja doświadczalna wymienionych metod zliczania cykli wykazała, że najbliższe doświadczalnym są wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej według metod: RPM, FCM i RFM.

3. WPŁYW CZYNNIKÓW ZWIĄZANYCH Z OPISEM WŁASNOŚCI CYKLICZNYCH MATERIAŁU

Własności cykliczne materiałów opisuje się za pomocą wykresów zmęczeniowych: w ujęciu naprężeniowym – wykresami Wöhlera, w ujęciu odkształceniowym – wykresami Mansona-Coffina oraz Ramberga-Osgooda lub w ujęciu energetycznym.

Wykresy te wyznacza się w badaniach zmęczeniowych w warunkach obciążeń sinusoidalnych na różnych poziomach obciążenia. Jak wiadomo, wyniki badań zmęczeniowych ze względu na złożoność procesu zmęczenia charakteryzują się znacznym

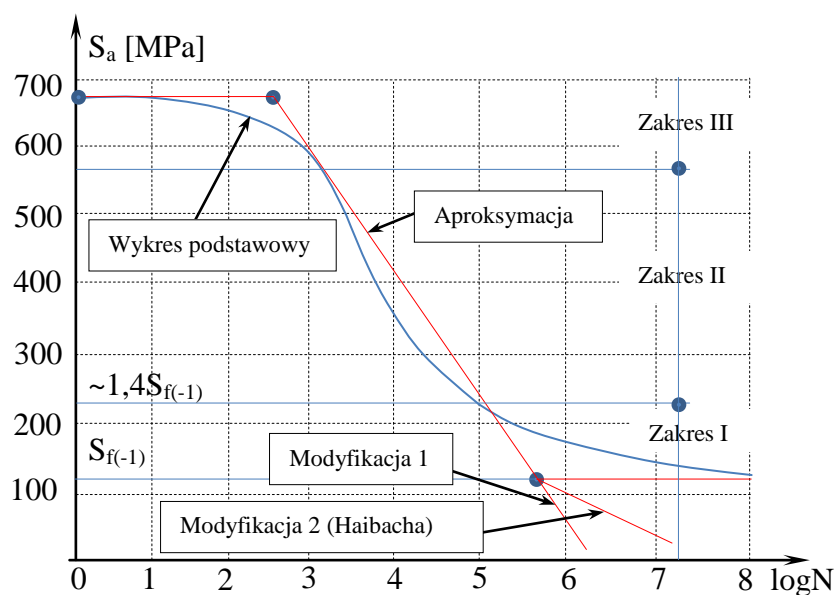
rozrzutem wartości, wymagają zatem odpowiednich opracowań statystycznych, a na dokładność opisu własności cyklicznych materiałów ma istotny wpływ liczba przeprowadzonych prób.



Rys. 1. Wykres zmęzeniowy próbek stalowych [6]
Fig. 1. Fatigue life curve of steel specimens [6]

Na rys. 1 zamieszczono wykres zmęzeniowy wyznaczony na podstawie wyników badań 321 próbek stalowych [6]. Z danych zamieszczonych na rysunku wynika, że rozrzut wyników badań na poszczególnych poziomach obciążeń jest znaczny i rośnie ze spadkiem wartości amplitudy naprężenia S_a . Linia wykresowa poprowadzona przez wartości średnie trwałości N ma złożony kształt i wykazuje wyraźne strefy przejścia z zakresu wysokocyklowego zmęczenia (WCZ) w zakres niskocyklowego zmęczenia (NCZ) oraz w strefie przejścia z zakresu WCZ w zakres granicy zmęczenia (GZ).

Wykresy tego rodzaju aproksymuje się za pomocą linii prostych w układach współrzędnych semilogarytmicznych (S_a , $\log N$) lub bilogarytmicznych ($\log S_a$, $\log N$). Przykład takiej aproksymacji pokazano na rys. 2, na którym linię ciągłą z rys. 1 zastąpiono linią łamaną.



Rys. 2. Schemat aproksymacji wykresu zmęzeniowego
Fig. 2. Approximation scheme of fatigue life curve

Z porównania przebiegu wykresu podstawowego z aproksymacją widać istotne różnice pomiędzy nimi, zwłaszcza w zakresie I przejścia z WCZ w GZ oraz w zakresie III przejścia z WCZ w NCZ. Ponadto na wykresie zaznaczono schematycznie problem wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia na trwałość zmęczeniową uwzględniany przez modyfikację 1. i 2. wykresu zmęczeniowego w zakresie powyżej GZ.

W dotychczasowych metodach obliczeń dla zakresu III – NCZ proponuje się opis wykresu zmęczeniowego w ujęciu odkształceniowym lub energetycznym. Problem obliczeniowy polega jednakże na tym, że widma obciążeń, o których wspomniano w p. 2 tego opracowania, zawierają cykle obciążenia leżące zarówno w zakresie II – WCZ, jak i w zakresie III – NCZ. Dla takiego przypadku w pracy [7] zaproponowano hybrydową metodę obliczeń trwałości zmęczeniowej, łączącej podejście naprężeniowe w zakresie WCZ i odkształceniowe NCZ.

Szczegółowa analiza czynników związanych z modelami wykresów zmęczeniowych w ujęciu naprężeniowym, które mają wpływ na obliczaną trwałość zmęczeniową i zgodność wyników tych obliczeń z wynikami badań, zostanie przedstawiona w referacie pt. „Modele wykresów zmęczeniowych w obliczeniach trwałości zmęczeniowej elementów maszyn – przykłady badań”, wygłoszonym na XXVI Sympozjone PKM.

4. WPLYW HIPOTEZY SUMOWANIA USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH NA OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Z wprowadzenia p. 1 wynika, że spośród licznych hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych powszechnie zastosowanie znalazła hipoteza liniowa Palmgren-Minera (PM). Podstawowa postać hipotezy jest następująca: $\sum n_i/N_i = 1$, gdzie n_i jest liczbą cykli o amplitudzie S_{ai} , N_i jest liczbą cykli do pęknięcia zmęczeniowego przy obciążeniu S_{ai} . Liczne badania weryfikacyjne, omówione m.in. w pracy [1], wykazały słabą skuteczność liniowej hipotezy w jej podstawowej postaci. W związku z tym zaproponowano jej modyfikację do postaci $\sum n_i/N_i = a$, gdzie współczynnik a jest zależny od wielu czynników, co istotnie utrudnia właściwy dobór jego wartości. Wartość współczynnika a jest zarazem miarą zgodności wyników badań z wynikami obliczeń trwałości zmęczeniowej $a = N_{ex}/N_{obl}$.

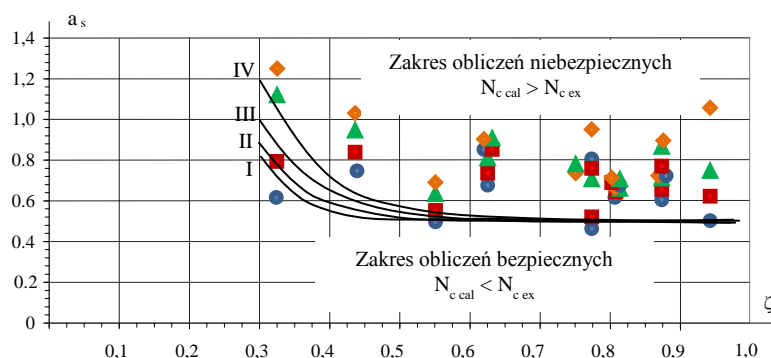
Schütz i Zenner [8], analizując wyniki z 561 prac, wyznaczyli rozkład wartości współczynnika a dla stopów żelaza, aluminium i tytanu. Z rozkładu tego wynika, że średnia wartość współczynnika a wynosi ok. 1,0, natomiast rozrzut tej wartości jest znaczny i zawiera się w przedziale od 0,1 do 10, a w sporadycznych przypadkach więcej. Dane te zostały potwierdzone m.in. w pracy [1], w której analizowano ponadto wpływ warunków obciążenia, rodzaju materiału i postaci próbek na wartość współczynnika a . Z analizy tej wynika, że istotny wpływ na wartość współczynnika a ma wartość naprężeń maksymalnych i minimalnych w widmie obciążeń, przy czym wysokie wartości, $a \gg 1,0$ – uzyskuje się w warunkach, gdy S_{max} leży w zakresie GZ wykresu zmęczeniowego. Orientacyjne obszary zmienności dla zakresów I, II i III z rys. 2 zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2

Wartości współczynnika a dla zakresów NCZ, WCZ i GZ

Zakres	Wartość współczynnika a
I – GZ	$1,5 < a < 30$
II – WCZ	$0,4 < a < 1,5$
III – NCZ	$0,75 < a < 1,3$

W ramach projektu 2221/B/T02/2010/39 przeprowadzono weryfikację doświadczalną hipotezy PM dla stali C45 w zróżnicowanych warunkach obciążeń: postaci widma i wartości maksymalnych naprężeń w widmie. Wyniki zbiorcze szczegółowej analizy pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Graniczne linie dla doświadczalnych wartości współczynnika a
 Fig. 3. Limit lines for experimental values of the coefficient a

Na rys. 3 liczbami rzymskimi I, II, III i IV oznaczono poziomy maksymalnych naprężeń: w widmie I – powyżej R_e , II – w granicach R_e , III – pomiędzy R_e i $S_{f(-1)}$ i IV – w obszarze GZ. Poziomom tym odpowiadają indeksy: I – ●; II – ■; III – ▲; IV – ◆. Postać widma obciążenia jest charakteryzowana wartością współczynnika wypełnienia widma ζ . Z rozkładu punktów i linii granicznych wynika, że wartość współczynnika a zależy od wartości naprężeń maksymalnych w widmie i współczynnika wypełnienia widma. Najniższe wartości osiąga współczynnik a dla wysokich wartości ζ i wysokich wartości maksymalnych naprężeń w widmie.

5. PODSUMOWANIE

Celem artykułu jest zwrócenie uwagi na dużą liczbę czynników mających wpływ na zgodność wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej. Świadomość tego faktu zmusza konstruktora do szczegółowej analizy warunków obciążeń i własności cyklicznych materiału celem dobrania takich, które umożliwiają bezpieczną ocenę trwałości.

W pracy podano literaturę niezbędną dla pogłębienia omawianych zagadnień. W podanych źródłach można znaleźć dalsze szczegółowe dane do właściwych obliczeń.

Praca naukowa sfinansowana przez MNiSW oraz NCN w ramach projektu badawczego własnego nr 2221/B/T02/2010/39.

Bibliografia

1. Szala J.: Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1998.
2. Szala J., Ligaj B.: Trwałość zmęczeniowa elementów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programowanych, Problemy Eksploatacji, 4, Radom 2005.

3. Boroński D.: Metody badań odkształceń i naprężeń w zmęczeniu materiałów i konstrukcji, Wydawnictwo ITE-PIB, Radom 2007.
4. Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych, wyd. III, Wydawnictwa Naukowe PMN, Warszawa 1997.
5. Ligaj B.: An analysis of the influence of cycle counting methods on fatigue life calculations of steel, Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance, 4(168), vol. 46, Radom 2011.
6. Weibull W.: Fatigue Testing and Analysis of Results, Pergamon Press, 1961.
7. Ligaj B., Szala G.: Comparative analysis of fatigue life calculation methods of C45 steel in conditions of variable amplitude loads in the low- and high-cycle fatigue ranges, Polish Maritime Research, No. 4(76), vol. 19, Gdańsk 2012.
8. Shütz W., Zenner H.: Schadensakkumulationshypothese zur Lebensdauervorhersage bei Schwingen der Beanspruchung, Teil 1, Ein kritischer Überblick, Werkstofftechnik 4, Nr 1, 1973.