

Bogdan LIGAJ¹

OCENA WPŁYWU CHARAKTERU OBCIĄŻENIA LOSOWEGO NA WYNIKI OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ Z ZASTOSOWANIEM DWUPARAMETRYCZNYCH CHARAKTERYSTYK ZMĘCZENIOWYCH

Zagadnienia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń losowych są niesłychanie trudne. Wynika to z probabilistycznej natury czynników mających na nią wpływ, do których zalicza się cechy konstrukcyjne, technologiczne oraz czynniki związane z warunkami eksploatacji. Te ostatnie mają wpływ na charakter obciążenia losowego, a tym samym na postać widma obciążenia stosowanego w obliczeniach trwałości zmęczeniowej.

W pracy została przedstawiona analiza wybranych przebiegów obciążeń eksploatacyjnych, będących wynikiem pomiarów, charakteryzujących się różną szerokością widma. Przyjęte przebiegi zostały poddane tzw. schematyzacji przeprowadzonej z zastosowaniem metody pełnych cykli (full cycles count method). Uzyskane zbiory cykli, dla każdego z przebiegów, pozwoliły na opracowanie widm obciążenia użytych w obliczeniach trwałości zmęczeniowej wraz z dwuparametryczną charakterystyką zmęczeniową oraz hipotezą sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren-Minera.

EVALUATION OF RANDOM LOADING CHARACTER ON FATIGUE LIFE CALCULATION RESULTS WITH THE APPLICATION OF TWO-PARAMETRIC FATIGUE CHARACTERISTICS

Problems of machine components fatigue life in random loading conditions are extremely difficult. It results from probabilistic nature of factors that influence fatigue life including design, technology and service factors. The last ones influence random loading and as a consequence on loading spectrum applied in fatigue life calculations.

The paper presents the analysis of chosen operational loading courses that are a result of measurements, characterized by a different spectrum broad range. Assumed courses underwent so called schematization process performed with the usage of full cycles count method. The obtained cycle sets, for each of courses, enabled to elaborate loading spectra used in fatigue life calculations along with two-parametric fatigue life description and the Palmgren-Miner hypothesis of damage accumulation.

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn, Polska;
85-789 Bydgoszcz; ul. Kaliskiego 7. Telefon: + 48 52 340-82-53, Fax: + 48 52 340-82-71
e-mail: bogdanj@utp.edu.pl

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- E – moduł sprężystości wzdłużnej (Younga) w MPa,
 N – liczba cykli oznaczenie ogólne (trwałość zmęczeniowa),
 N_{cal} – liczba cykli wyznaczona na drodze obliczeń na i -tym poziomie obciążenia S_{max} ,
 N_e – liczba lokalnych ekstremów (maksimów i minimów) w przebiegu obciążenia,
 N_i – liczba przecięć poziomu wartości średniej przez półcykle rosnące i malejące,
 N_{ij} – liczba cykli wyznaczona na podstawie dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej dla zmiennych wartości S_{mij} i S_{aij} ,
 N_0 – bazowa liczba cykli dla granicy zmęczenia R_{-1} ,
 $N_{R=-1}$ – liczba cykli charakteryzująca wykres zmęczeniowy Wöhlera na określonym poziomie naprężeń S_{max} ,
 R_{eL} – dolna granica plastyczności materiału w MPa,
 R_m – wytrzymałość materiału na rozciąganie w MPa,
 R_{-1} – granica zmęczenia dla cyklu wahadłowego dla liczby cykli N_0 w MPa,
 S_a – amplituda naprężenia w cyklu sinusoidalnym w MPa,
 S_i – wartości lokalnego naprężenia normalnego na i -tym poziomie obciążenia w MPa,
 S_m – wartość średnia naprężenia w cyklu sinusoidalnym w MPa,
 S_{max} – wartość maksymalna naprężenia w cyklu sinusoidalnym w MPa,
 S_{min} – wartość minimalna naprężenia w cyklu sinusoidalnym w MPa,
 i – ogólne oznaczenie poziomu obciążenia lub wartości amplitud ($i = 1, 2, \dots, k$),
 j – ogólne oznaczenie poziomu wartości średniej ($j = 1, 2, \dots, p$),
 m_0 – wykładnik potęgi we wzorze opisującym wykres zmęczeniowy (Wöhlera) dla obciążenia wahadłowego ($R = -1$),
 n_c – całkowita liczba cykli w widmie obciążenia,
 n_i – liczba cykli na i -tym poziomie amplitudy S_{ai} lub wartości średniej S_{mi} w widmie,
 n_{ij} – liczby cykli o zmiennych wartościach S_{aij} i S_{mij} w widmie obciążenia.

1. WPROWADZENIE

Ocenę trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych przeprowadza się na drodze doświadczalnej i obliczeniowej. Metody doświadczalne są długotrwałe i kosztowne. Dlatego są stosowane na końcowym etapie projektowania i mają charakter weryfikacyjny. W przypadku metod obliczeniowych stosowane są dwie: numeryczne i analityczne. Ich zastosowanie pozwala na dobór cech geometrycznych i materiałowych elementów maszyn ze względu na zmęczenie.

Obliczenia analityczne trwałości zmęczeniowej wymagają znajomości własności zmęczeniowych materiału w postaci charakterystyki $N(S_a)$ lub $N(S_m, S_a)$, przyjęcia hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych oraz opracowania widma obciążenia.

Eksplatację maszyn i urządzeń można podzielić na określone fazy, w czasie których poddawane są obciążeniom o różnym charakterze i wartości. Najistotniejszymi, ze względu na trwałość zmęczeniową, są te wynikające z warunków pracy. W przypadku pojazdów kołowych o charakterze obciążenia poszczególnych elementów konstrukcyjnych decyduje prędkość jazdy, stan i rodzaj nawierzchni, wykonywane manewry (np. przyspieszanie, hamowanie, skręt), itp.[8]. Standardowe widma obciążenia statków powietrznych obejmują start–lot–lądowanie [1]. Różnice w charakterze widm wynikają z rodzaju

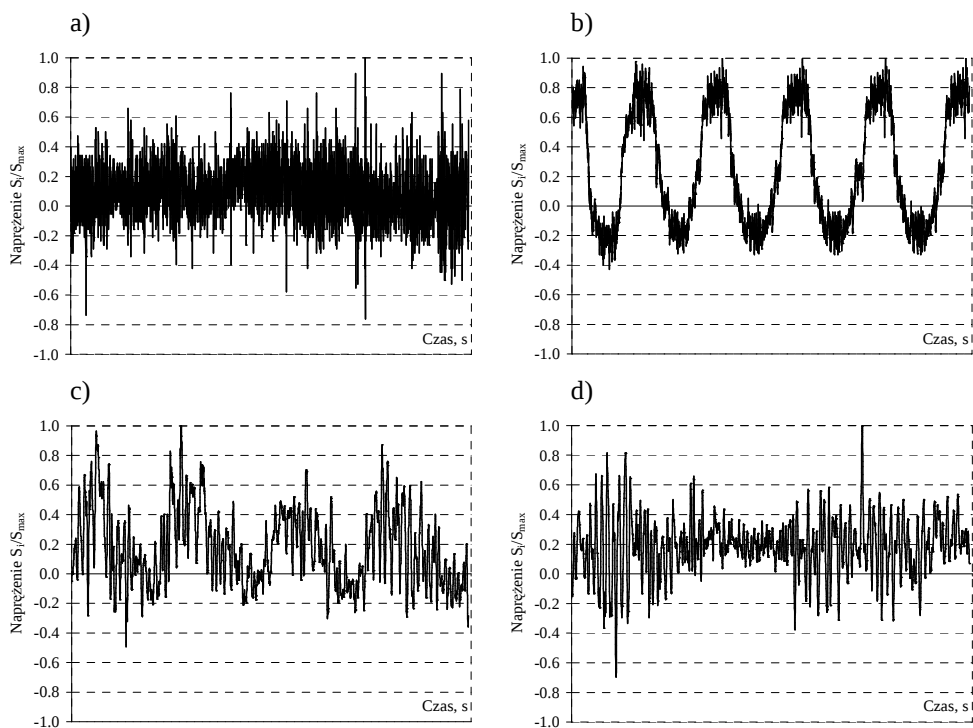
wykonywanych manewrów w czasie lotu, stopnia zatankowania samolotu oraz fragmentu konstrukcji, dla której zostały opracowane.

Przedmiotem niniejszej pracy jest ocena wpływu charakteru obciążenia losowego na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej.

Realizacja postawionego celu wymaga przeprowadzenia analizy wybranych przebiegów zmian naprężeń oraz wyznaczenia, na podstawie wyników tzw. schematyzacji, widm obciążeń. Opracowane widma wraz z hipotezą sumowania uszkodzeń zmęczeniowych i dwuparametryczną charakterystyką zmęczeniową posłużą do oceny trwałości zmęczeniowej.

2. OBCIĄŻENIA EKSPLOATACYJNE

Na potrzeby pracy przyjęto cztery przebiegi obciążeń odpowiadające zmianą wartości naprężeń w czopie zwrotnicy samochodu osobowego (rys.1). Pobieźna ocena wskazuje na różny charakter obciążeń, który wynika z warunków prowadzonych pomiarów.



Rys. 1. Przebiegi zmian naprężeń w postaci wartości względnych dla nawierzchni: a – asfaltowej podczas jazdy na wprost (A), b – z kostki betonowej z wykonywanymi manewrami skrętu (B), c – gruntowej z wykonywanymi manewrami skrętu (C), d – gruntowej podczas jazdy na wprost (D)

Przebieg przedstawiony na rysunku 1a został zarejestrowany podczas jazdy po nawierzchni asfaltowej, w czasie której nie wykonywano żadnych manewrów. Na rysunku 1b przedstawiono przebieg odpowiadający jeździe po nawierzchni wykonanej z kostki betonowej. W czasie jazdy wykonywano manewry skrętu, na przemian, w lewo i prawo. Zmianę wartości naprężeń w elemencie konstrukcyjnym podczas jazdy po drodze gruntowej z dużą liczbą nierówności przedstawiono na rysunku 1c i 1d. Różnica pomiędzy przebiegami wynika z wykonywanych manewrów: na przemian realizowanych skrętów w lewo i prawo (rys. 1c) oraz jazdy na wprost (rys. 1d). Wszystkie przebiegi zostały zarejestrowane podczas jazdy ze stałą prędkością. W dalszej części pracy identyfikacja przebiegów będzie prowadzona według oznaczeń podanych w nawiasach w podpisie rysunku 1. Zamieszczone wykresy zmian naprężeń są wybranymi fragmentami prowadzonych rejestracji i odpowiadają odcinkom czasowym wynoszącym 30 sekund. Przebiegi przedstawiono w postaci wartości względnych $S_i/S_{\max}$. Wartość maksymalną $S_{\max}$ odczytano niezależnie dla każdego z analizowanych przypadków.

Istotnych informacji, ze względu na możliwość oceny przebiegów obciążeń, dostarcza ocena statystyczna. Składową statyczną i dynamiczną obciążenia identyfikuje, odpowiednio, estymator wartości średniej i wariancji. Estymator skośności i kurtozy wskazuje na kształt rozkładu prawdopodobieństwa wartości względem rozkładu normalnego. Wyniki obliczeń wybranych parametrów statystycznych dla poszczególnych obciążeń zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Wartości wybranych estymatorów parametrów statystycznych

Estymatory parametrów statystycznych		Przebieg obciążeń			
		A	B	C	D
Wartość średnia	MPa/MPa	0.0936	0.2646	0.1735	0.1893
Wariancja	(MPa/MPa) ²	0.0263	0.1537	0.0657	0.0389
Odchylenie standardowe	MPa/MPa	0.1622	0.3920	0.2563	0.1972
Skośność	MPa/MPa	0.0569	0.1542	0.5047	-0.1993
Kurtoza	MPa/MPa	1.0575	-1.5692	-0.3797	1.2830
Wartość minimum	MPa/MPa	-0.76	-0.43	-0.50	-0.70
Wartość maksimum	MPa/MPa	1.00	1.00	1.00	1.00
Rozstęp	MPa/MPa	1.76	1.43	1.50	1.70

Oceniając uzyskane wyniki obliczeń można dostrzec różnice wartości opisujących składową statyczną obciążeń z wyjątkiem przebiegów C i D, dla których uzyskano zbliżone wartości. Analizując wartości wariancji dostrzegalne są istotne różnice. Największa została wyznaczona dla obciążenia B, najmniejsza dla obciążenia A. Wzrokowa ocena przyjętych przebiegów wskazuje na ich zróżnicowany charakter. Potwierdziły to także wartości składowej statycznej i dynamicznej obciążenia. Można na tej podstawie stwierdzić, że istnieje wpływ rodzaju wykonywanych manewrów oraz oddziaływania nawierzchni na charakter obciążenia. Dokonując oceny rozkładu prawdopodobieństwa analizowano wartości skośności i kurtozy. Wyniki wymienionych parametrów dla wszystkich przebiegów są zdecydowanie różne od wyników cechujących rozkład normalny [2, 4]. Dokładne określenie typu rozkładu wymaga przeprowadzenie odpowiednich testów, które w tej pracy nie będą prowadzone.

3. WIDMA OBCIĄŻEŃ

Cechą charakteryzującą przebiegi zmian naprężeń jest szerokość widma obciążeń. Dokładną ocenę przeprowadza się na podstawie funkcji autokorelacji oraz widmowej gęstości mocy. Lecz istnieje uproszczona metoda oceny bazująca na wartości współczynnika I [8]. Wartość wymienionego współczynnika jest ilorazem sumy lokalnych ekstremów i liczby przecięć poziomu wartości średniej przez półcykle rosnące i malejące. Zależność [8] wyrażono wzorem (1)

$$I = \frac{N_i}{N_e} \quad (1)$$

Wyznaczenie wartości współczynnika I wymagało podzielenia przebiegów na przedziały klasowe o stałej szerokości. Przyjęta liczba przedziałów wynosiła 20. Następnie wyznaczono przebiegi w postaci lokalnych ekstremów. Pozwoliło to na przeprowadzenie stosownych obliczeń według wzoru (1). Wartości współ. I zamieszczono w tabeli 2.

Tab. 2. Wartości współczynnika I dla przejętych przebiegów obciążeń

	Przebieg obciążeń			
	A	B	C	D
Wartość współczynnika I	0.678	0.047	0.298	0.565

Wyniki obliczeń wykazują istotne różnice, co świadczy o zróżnicowanym charakterze przyjętych obciążeń. Wartości współczynnika I pozwalają zakwalifikować przebiegi do obciążeń o szerokim widmie [8, 9].

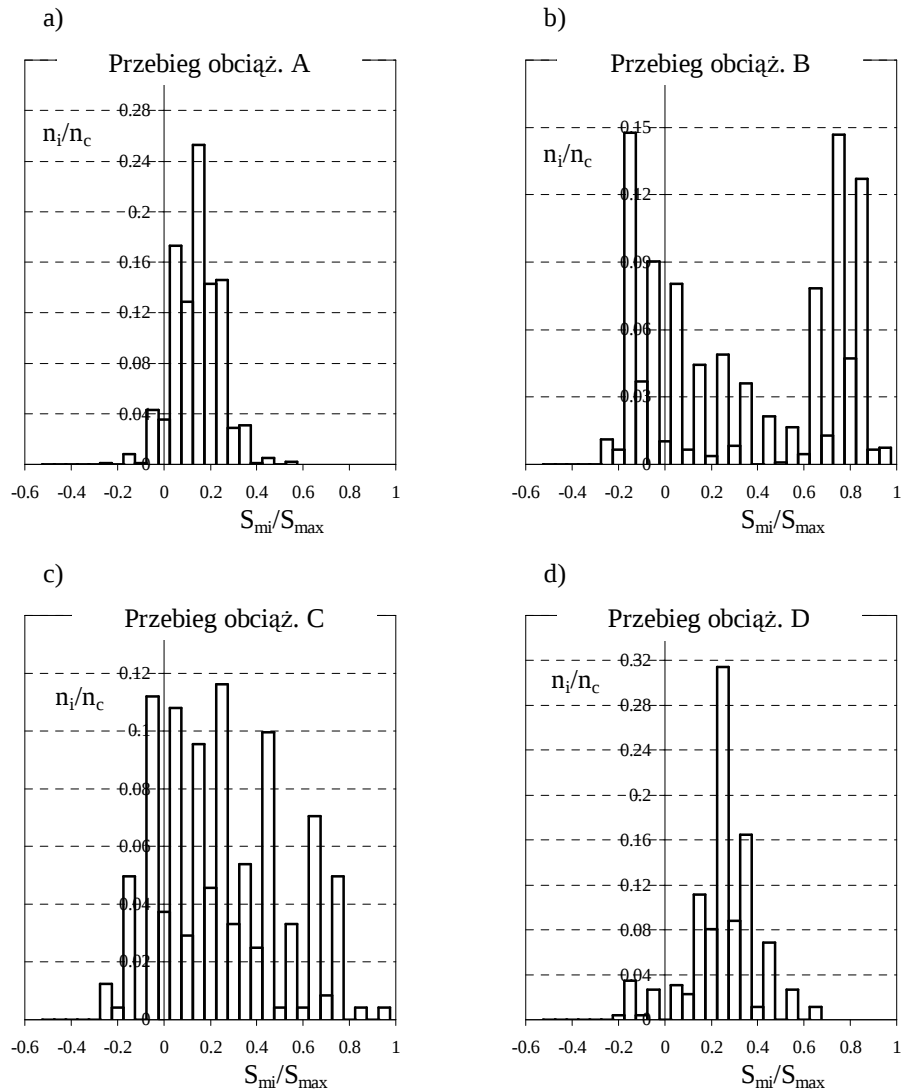
Następnie przebiegi obciążeń poddano tzw. schematyzacji. Spośród znanych metod, przedstawionych w pracach [3, 6], zastosowano metodę zliczania pełnych cykli. Zadecydowały o tym, przedstawione w pracy [5], wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej, które wykazywały najwyższą zgodność z wynikami badań doświadczalnych.

Tab. 3. Zestawienie parametrów statystycznych dla rozkładów wartości średnich i amplitud

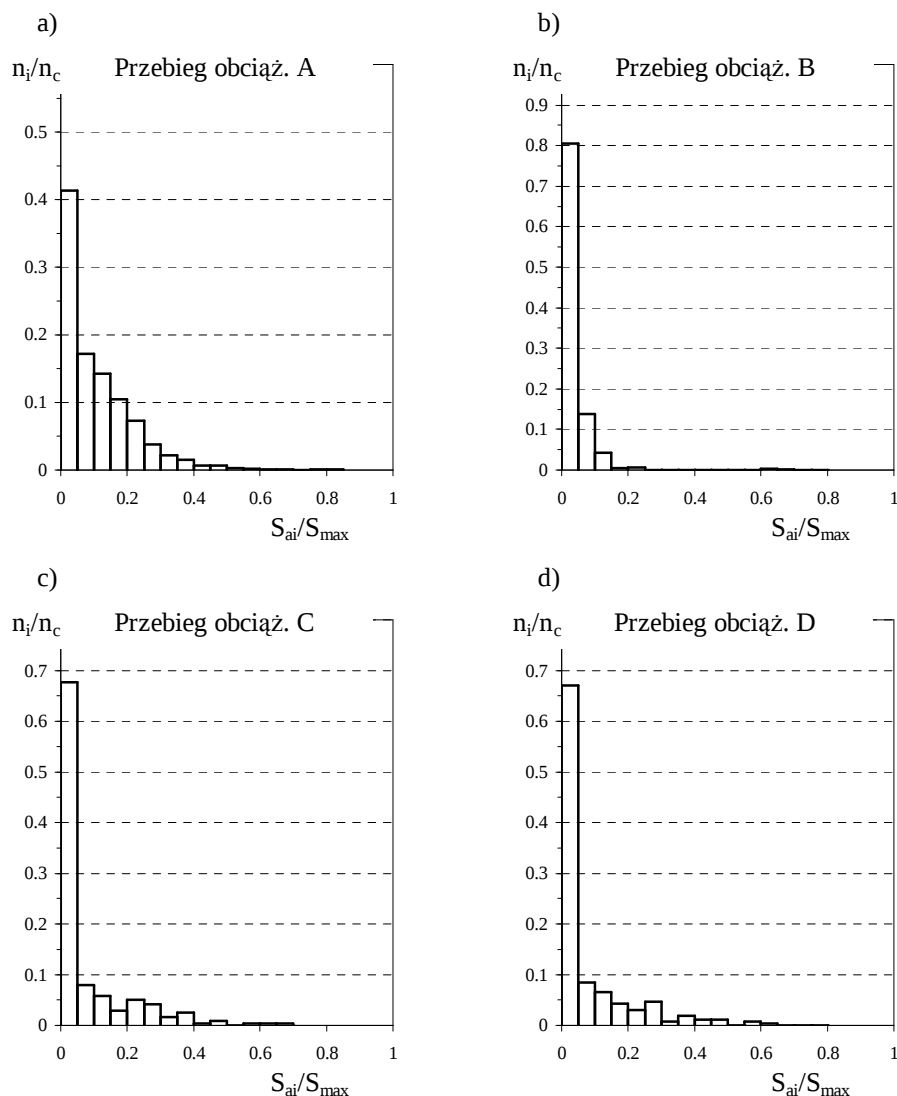
Rozkład	Wartości estymatorów	Przebieg obciążeń			
		A	B	C	D
$\frac{S_{mi}}{S_{max}}$	Wartość średnia	0.144	0.356	0.228	0.249
	Wariancja	0.010	0.155	0.068	0.021
	Odchylenie stand.	0.100	0.394	0.259	0.146
	Skośność	-0.0049	-0.0263	0.5146	-0.5234
	Kurtoza	0.7245	-1.6720	-0.5915	1.4919
$\frac{S_{ai}}{S_{max}}$	Wartość średnia	0.134	0.066	0.102	0.106
	Wariancja	0.011	0.003	0.014	0.014
	Odchylenie stand.	0.106	0.051	0.116	0.119
	Skośność	1.8299	8.0538	2.3691	1.5516
	Kurtoza	4.8331	87.0038	6.1717	6.8470

W wyniku przeprowadzonej schematyzacji wyznaczono zbiory cykli sinusoidalnych dla każdego przebiegu obciążeń. Zgromadzone dane posłużyły do opracowania widm obciążeń

pozwalających na charakterystykę rozkładu wartości średnich S_{mi}/S_{max} i amplitud S_{ai}/S_{max} . Wartości wybranych estymatorów parametrów statystycznych przedstawiono w tabeli 3, natomiast na rysunku 2 i 3 histogramy częstości występowania cykli dla określonego rozkładu wartości.



Rys. 2. Histogramy częstości występowania wartości średnich S_{mi}/S_{max} w widmie obciążeń dla: a – przebiegu A, b – przebiegu B, c – przebiegu C, d – przebiegu D



Rys. 3. Histogramy częstości występowania amplitud S_{ai}/S_{max} w widmie obciążeń dla: a – przebiegu A, b – przebiegu B, c – przebiegu C, d – przebiegu D

Wartości parametrów statystycznych oraz histogramy częstości (rys. 2) wyznaczone dla rozkładu wartości średnich S_{mi}/S_{max} wskazują na istotne różnice analizowanych obciążeń. Pewnym podobieństwem charakteryzują się przebiegi A i D. Uzyskano dla nich zbliżone wartości wariancji oraz wartości średniej. Lecz różnice w wartościach skośności i kurtozy wskazują na inny charakter rozkładu, co potwierdza kształt histogramów. Rozkład wartości

średnich S_{mi}/S_{max} dla przebiegu A jest zbliżony do rozkładu normalnego na co wskazują wartości w tabeli 3.

W przypadku obciążenia D parametry statystyczne wskazują na większe „wyostrzenie” rozkładu wartości średnich w stosunku do rozkładu normalnego. Związane jest to dominującą liczbą cykli mieszczących się w przedziale $S_{mi}/S_{max} = 0.2 \div 0.25$. Histogram częstości przedstawiony na rysunku 2b wskazuje na koncentrację cykli w dwóch obszarach. Pierwszy dotyczy zakresu $S_{mi}/S_{max} = -0.2 \div 0.1$, natomiast drugi zakresu $S_{mi}/S_{max} = 0.6 \div 0.9$. Pozostałe zakresy zmienności S_{mi}/S_{max} charakteryzuje istotnie mniejsza liczba cykli. W przypadku obciążenia C rozkład wartości średniej odbiega od rozkładu normalnego o czym świadczą wartości skośności i kurtozy oraz kształt histogramu (rys. 2c). Udziały poszczególnych wartości średnich S_{mi}/S_{max} w widmie obciążeń wykazują najmniejsze różnice i rozkładają się równomiernie w całym zakresie zmienności.

Szeroki zakres zmienności S_{mi}/S_{max} dla przebiegu B i C ma odbicie w wartości współczynnika I. Na tej podstawie można stwierdzić, że przebiegi obciążeń B i C charakteryzują się szerszym widmem obciążenia niż przebiegi A i D.

Analizie poddano rozkłady amplitud S_{ai}/S_{max} w widmie obciążeń. Wartości estymatorów parametrów statystycznych przedstawiono w tabeli 3, a histogramy częstości występowania na rysunku 3. Dla przebiegów A, C i D uzyskano zbliżone wyniki obliczeń wszystkich parametrów. W przypadku przebiegu B wartości wariancji i wartości średniej były istotnie różne. Wskazuje to na mniejszy zakres zmienności wartości amplitud cykli wchodzących w skład widma obciążeń. Potwierdza to histogram (rys. 3b), na którym dominującą wartość stanowią cykle o najniższej amplitudzie. W przypadku obciążeń C (rys. 3c) i D (rys. 3d) najliczniejszą grupę stanowią cykle o najniższej wartości amplitudy (podobnie jak w obciążeniu B). Oprócz wymienionej grupy występują cykle o wyższych amplitudach, lecz ich liczba jest istotnie mniejsza. Rozkład wartości S_{ai}/S_{max} dla przebiegu A (rys. 3a) wykazuje na znaczący udział cykli o wyższych amplitudach w widmie obciążeń. Zauważalna jest także dominująca liczba cykli o najniższej wartości amplitudy. Jednak w tym przypadku wartość różnic n_i/n_c dla określonych poziomów S_{ai}/S_{max} jest zdecydowanie mniejsza w porównaniu do różnic dla pozostałych obciążeń.

4. WYNIKI OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ I ICH ANALIZA

Obliczenia trwałości zmęczeniowej, dla przyjętych widm obciążeń, przeprowadzono z zastosowaniem dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej wyznaczonej dla stali S355J0 (dawne oznaczenie stali: 18G2A). Własności wytrzymałościowe wymienionego stopu otrzymane z próby statycznego rozciągania są następujące: granica plastyczności $R_{eL} = 499.9$ MPa (8.4 MPa), wytrzymałość materiału $R_m = 678$ MPa (7.1 MPa) i moduł Younga $E = 208159$ MPa (1306 MPa). W nawiasach podano wartości odchylenia standardowego dla wymienionych parametrów. Przeprowadzono także badania w warunkach obciążeń zmiennych stałoamplitudowych o współczynniku asymetrii cyklu $R = -1$, których wynikiem był wykres zmęczeniowy Wöhlera. Postać równania dla wymienionego wykresu przedstawia zależność (2)

$$\log S_{max} = -0.0811 \log N + 2.9247 . \quad (2)$$

Na podstawie współczynnika kierunkowego, występującego w równaniu, wyznaczono wartość wykładnika potęgi $m_0 = 12,33$. Granica zmęczenia materiału wynosi $R_{-1} = 274$ MPa dla liczby cykli $N_0 = 10^6$.

Własności zmęczeniowe stali dla zmiennych wartości S_m i S_a opisuje dwuparametryczna charakterystyka zmęczeniowa. Wymienioną charakterystykę zaczerpnięto z pracy [10, 11] i przedstawiono w postaci równania (3), do którego podstawiono wartości wyznaczonych parametrów

$$N = 10^6 \left[\frac{274}{S_a} \left(1 - \frac{S_m}{678} \right) \right]^{12,33} \quad \text{dla} \quad S_{\max} \geq R_{-1}. \quad (3)$$

W obliczeniach zastosowano liniową hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrena-Minera [7]. Całkowite uszkodzenie zmęczeniowe spowodowane wszystkimi cyklami o zmiennych wartościach S_a i S_m opisane jest wzorem (4)

$$D = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^p D_{ij} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^p \frac{n_{ij}}{N_{ij}}. \quad (4)$$

Trwałość zmęczeniową w liczbie cykli obliczamy ze wzoru (5)

$$N_{\text{cal}} = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^p n_{ij}. \quad (5)$$

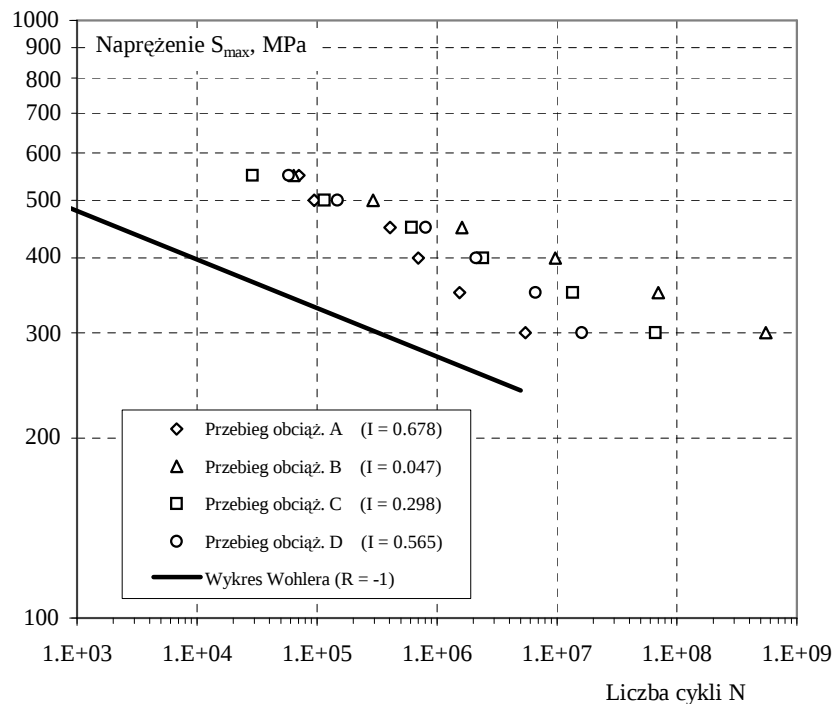
Obliczenia trwałości zmęczeniowej dla przebiegów obciążeń A, B, C i D prowadzono dla sześciu poziomów naprężeń maksymalnych $S_{\max}$: 300 MPa, 350 MPa, 400 MPa, 450 MPa, 500 MPa i 550 MPa. Otrzymane wyniki zamieszczono na rysunku 4.

Wymieniony wykres został sporządzony w układzie bilogarytmicznym. Otrzymane wyniki obliczeń, dla poszczególnych widm obciążeń, oznaczono punktami, które definiuje zamieszczona legenda. Na wykresie umieszczono wyniki badań doświadczalnych w warunkach obciążeń stałoamplitudowych dla $R = -1$ (wykres Wöhlera). Wstępna ocena wyników obliczeń wskazuje, że różnice pomiędzy wartościami trwałości zależy od poziomu naprężeń maksymalnych $S_{\max}$.

Dokonując szczegółowej oceny wyników obliczeń za punkt odniesienia przyjęto wykres Wöhlera. Warunki obciążenia, w jakich został wyznaczony, można scharakteryzować współczynnikiem $I = 1$, co świadczy o najcięższych z możliwych warunków. Pozwoliło to na wyznaczenie ilorazu trwałości obliczeniowej N_{cal} i doświadczalnej $N_{R=-1}$. Wyniki analizy zostały przedstawione w postaci wykresu słupowego (rys. 5), na którym podano wartości $N_{\text{cal}}/N_{R=-1}$.

Analizując wyniki $N_{\text{cal}}/N_{R=-1}$ dla poszczególnych przebiegów obciążeń zauważalne są znaczące różnice. Zależą od poziomu naprężeń maksymalnych $S_{\max}$. Najwyższą trwałość uzyskano dla przebiegu B dla wszystkich poziomów naprężeń z wyjątkiem $S_{\max} = 550$ MPa. Wraz ze spadkiem wartości $S_{\max}$ zdecydowanie wzrasta wartość trwałości. Jest to związane z charakterem obciążenia, w którego skład wchodzi cykl z szerokiego zakresu

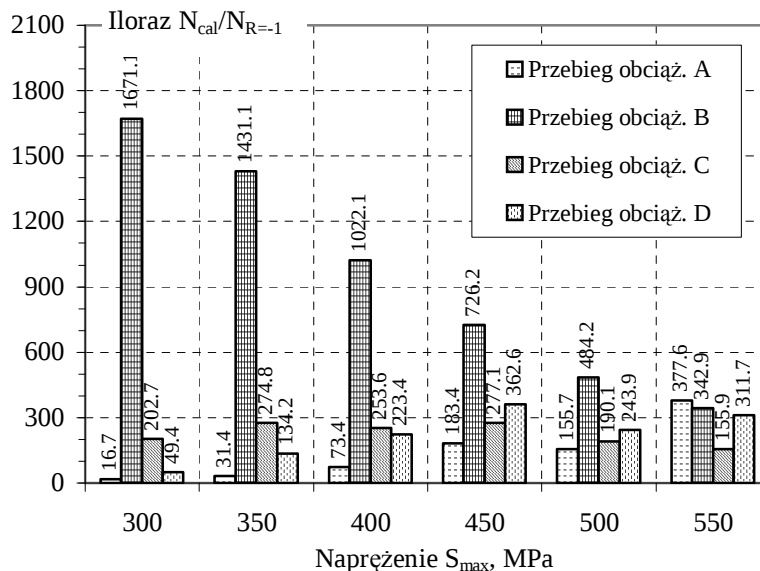
wartości średniej i wąskiego przedziału wartości amplitud. Należy także przypomnieć, że dla obciążenie B uzyskano najniższą wartość współczynnika $I = 0.047$.



Rys. 4. Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej dla przyjętych przebiegów obciążeń

W przypadku obciążenia A uzyskano najniższe wartości trwałości dla zakresu naprężeń $S_{max} = 300\div 500$ MPa. Jest to związane ze znaczącym udziałem w widmie obciążenia cykli o wyższych wartościach amplitudy. Wartość współczynnika I charakteryzującego przebieg była najwyższa. Wyniki obliczeń trwałości dla przebiegu C i D w zakresie naprężeń $S_{max} = 300\div 500$ lokują się pomiędzy wynikami dla obciążeń A i B. Dla analizowanych przebiegów obciążeń dla $S_{max} = 400$ MPa uzyskano zbliżone trwałości. Dla naprężeń niższych od wymienionego poziomu w przypadku przebiegu C uzyskano wyższą trwałość od tej dla przebiegu D. Różnice otrzymanych wyników były istotne. W zakresie naprężeń wyższych od $S_{max} = 400$ MPa uzyskano odwrotną sytuację. Wyniki uzyskane dla przebiegu D były wyższe od tych dla przebiegu C, lecz cechowała je zdecydowanie mniejsza różnica wartości. Przyczyn zaistniałej sytuacji należy upatrywać w rozkładzie wartości średnich S_{mi}/S_{max} , gdyż rozkłady amplitud S_{ai}/S_{max} są bardzo zbliżone o czym świadczą parametry statystyczne oraz postać histogramów. Szeroki zakres zmienności wartości średniej w przebiegu C może powodować wyższy wzrost liczby cykli mających wpływ na trwałość dla kolejnych naprężeń S_{max} , w stosunku do wzrostu występującego dla przebiegu D. Na

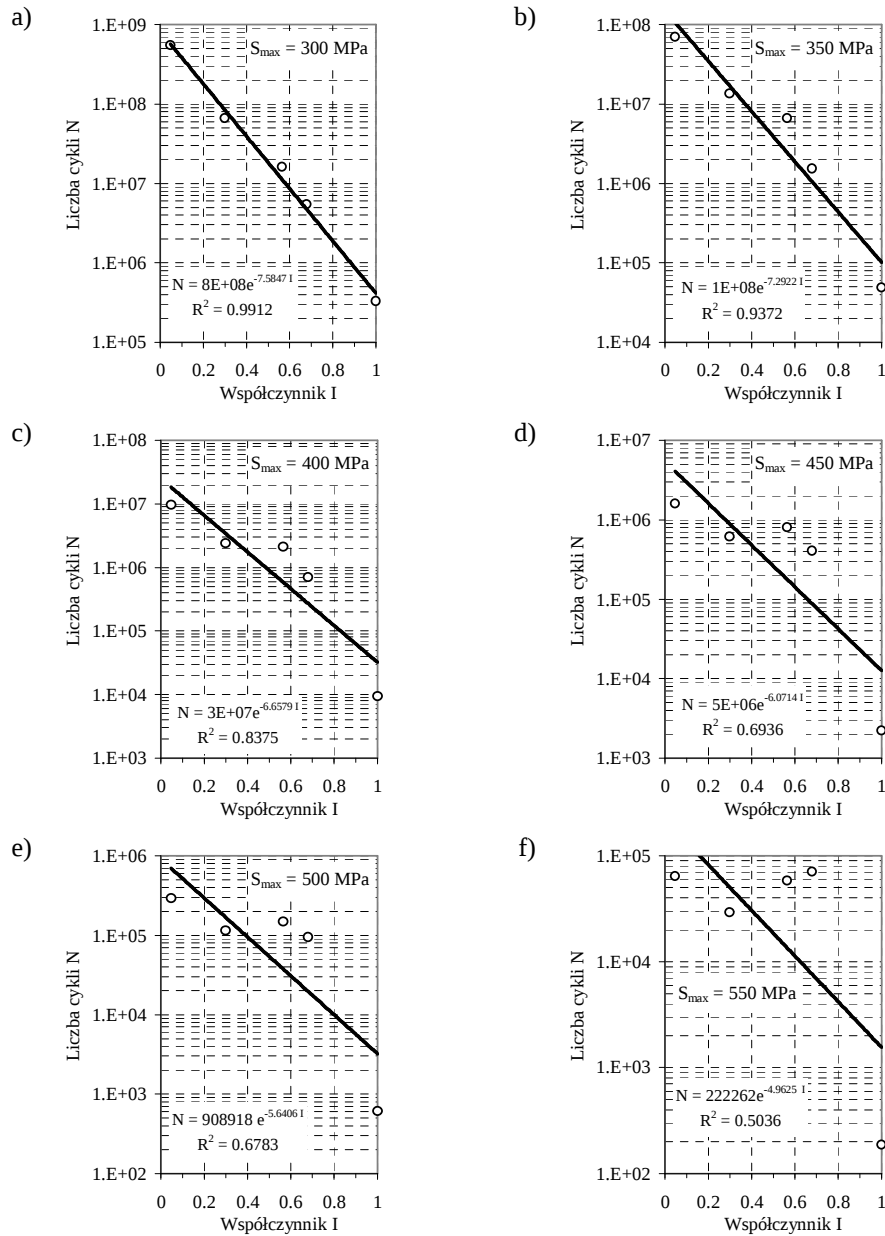
poziomie naprężeń $S_{\max} = 550$ MPa uzyskano zbliżone wyniki obliczeń dla wszystkich obciążeń z wyjątkiem przebiegu C. Powody zaistniałej sytuacji zostały wyjaśnione wyżej.



Rys. 5. Wyniki obliczeń $N_{cal}/N_{R=-1}$ dla przyjętych przebiegów obciążeń

Przyjęte do analizy przebiegi obciążeń zostały scharakteryzowane we wcześniejszej części pracy współczynnikiem I (tab. 2). Zestawienie wyników trwałości zmęczeniowej uzyskanych dla określonych wartości naprężeń $S_{\max}$ w odniesieniu do wartości wymienionego współczynnika, pozwoliło na opracowanie zależności przedstawionej na rysunku 6. Jako liczbę cykli dla $I = 1$ przyjęto wyniki badań doświadczalnych uzyskane dla obciążenia stałoamplitudowego o współczynniku $R = -1$. Jest to możliwe, gdyż wyniki obliczeń dla obciążenia wahadłowego są zgodne z wynikami opisanymi równaniem (2). Zamieszczone na rysunkach 6a+6f wyniki obliczeń aproksymowano prostą opisaną równaniem przedstawionym na wskazanych wykresach. Dodatkowo podano wartość współczynnika korelacji wyników badań R^2 .

Uzyskane wyniki trwałości zmęczeniowej dla zakresu naprężeń od $S_{\max} = 300$ MPa do $S_{\max} = 350$ MPa wykazują dużą zgodność z linią regresji. Świadczy o tym wysoka wartość współczynnika R^2 . Dla kolejnych poziomów $S_{\max}$ wartość współczynnika korelacji maleje, a wyniki charakteryzują się istotnym rozrzutem. Na wspomniany rozrzut ma wpływ wartość N_{cal} wyznaczona dla obciążeń A i D. W celu potwierdzenia przedstawionego spostrzeżenia przeprowadzmy wirtualną linię przez dwa skrajne punkty odpowiadające wartości $I = 0.047$ oraz $I = 1$. Oceniając wyniki trwałości N_{cal} względem poprowadzonej linii można zauważyć znaczący wzrost wartości dla $I = 0.565$ i $I = 0.678$.



Rys. 6. Zależność liczby cykli N od współczynnika I dla naprężeń $S_{\max}$: a – 300 MPa, b – 350 MPa, c – 400 MPa, d – 450 MPa, e – 500 MPa, f – 550 MPa

Trudno jednoznacznie wskazać przyczyny zaistniałej sytuacji. Mogą one być związane z rozkładem wartości średnich S_{mi}/S_{max} i amplitud S_{ai}/S_{max} w widmie obciążeń.

5. PODSUMOWANIE

Zróznicowany charakter obciążeń losowych został ujawniony: na drodze wizualnej oceny kształtu przebiegu, na podstawie rozkładu wartości średnich S_{mi}/S_{max} i amplitud S_{ai}/S_{max} w widmie oraz w wyniku obliczeń współczynnika I. Proste kryterium oceny, jakie stanowi wymieniony współczynnik, pozwala dobrze charakteryzować obciążenie o czym świadczą wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej. Na niskich poziomach naprężeń S_{max} istnieje możliwość powiązania trwałości zmęczeniowej N_{cal} z wartością współczynnika I. Dla wyższych wartości S_{max} stopień korelacji wyników jest mniejszy. Przyczyn należy upatrywać w rozkładzie wartości średnich S_{mi}/S_{max} i amplitud S_{ai}/S_{max} w widmie. Próba wyjaśnienia zaistniałej sytuacji będzie przedmiotem dalszych badań, których wyniki staną się podstawą publikacji.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] *Description of a Fighter Aircraft Loading Standard for Fatigue*, ICAF, 1976.
- [2] Klonecki W.: *Elementy statystyki dla inżynierów*, Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1996.
- [3] Kocańda S., Szala J.: *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, Warszawa 1997.
- [4] Koronacki J., Mielniczuk J.: *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2001.
- [5] Ligaj B.: *Impact of the method of elaboration of a load spectrum on the results of the calculation of S355J0 steel fatigue life*, Gdańsk, Journal of Polish CIMAC, 2010.
- [6] *Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*, ASTM E 1049-85 (Reapproved 1990).
- [7] Szala J.: *Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych*, Bydgoszcz, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, 1998.
- [8] Szala J.: *Obciążenia i trwałość zmęczeniowa elementów maszyn*, Bydgoszcz, Wydawnictwo ATR, Cz. I, Wyd. II, 1989.
- [9] Szala J., Lipski A., Ligaj B.: *Wpływ metody schematyzacji losowych obciążeń eksploatacyjnych na obliczoną trwałość zmęczeniową*, Radom, Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe nr 4 (59), str. 303-314, 2005.
- [10] Szala J., Szala G.: *Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe - sformułowanie problemu*, Radom, Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe nr 3 (42), str. 287-296, 2001.
- [11] Szala J., Szala G.: *Analiza porównawcza dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych i ich doświadczalna weryfikacja*, Radom, Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe nr 3 (42), str. 297-304, 2001.

Pracę wykonano w ramach projektu badań własnych nr 0715/B/T02/2008/35 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.