

Adam LIPSKI, Józef SZALA

WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA DWUPARAMETRYCZNYCH CHARAKTERYSTYK ZMĘCZENIOWYCH

W pracy przedstawiono zastosowanie dwuparametrycznych charakterystyk zmęczenia opisujących powierzchnie $N = f(S_m, S_a)$, uwzględniających zmienność parametrów cykli sinusoidalnych, do szacowania trwałości zmęczeniowej w przypadku obciążeń stałoamplitudowych i losowych obciążeń eksploatacyjnych. Obliczenia przeprowadzono dla stopu aluminium D16CzATW. Wyniki obliczeń zestawiono z wynikami badań eksperymentalnych. Na podstawie tego porównania sformułowano wnioski co do przydatności poszczególnych charakterystyk dwuparametrycznych do szacowania trwałości zmęczeniowej.

Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy
Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

1. WSTĘP

W pracy [1] przedstawiono uproszczone uogólnione charakterystyki zmęczeniowe, reprezentujące powierzchnie zmęczeniowe $N = f(S_m, S_a)$. Charakterystyki te ujmują zmienność parametrów cykli sinusoidalnych (współczynnika asymetrii cyklu, wartości średniej obciążenia itp.). Pozwala to na uniknięcie konieczności redukcji cykli o dowolnych wartościach naprężenia średniego S_m różnego od zera i amplitudzie naprężenia S_a do cykli wahadłowych o zastępczej wartości amplitudy $S_{a,zast}$ możliwych do zastosowania w przypadku obliczeń z użyciem klasycznych wykresów zmęczeniowych Wöhlera.

Dla określenia przydatności przedstawionych w pracy [1] charakterystyk zmęczeniowych wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej uzyskane przy ich zastosowaniu zestawiono z wynikami badań eksperymentalnych.

Badania własności materiałowych oraz badania eksperymentalne wykorzystane do weryfikacji obliczeń trwałości zmęczeniowej wykonano w akredytowanym przez Polskie Centrum Akredytacji Laboratorium Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, w ramach grantu KBN nr 7 T07B 010 18, przy zastosowaniu maszyn do badań wytrzymałościowych firmy Instron typu 8501 oraz 8502 wraz z oprzyrządowaniem.

2. WŁASNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Obliczenia trwałości zmęczeniowej, jak i badania eksperymentalne przeprowadzono dla stopu aluminium D16CzATW. Poniżej przedstawiono własności wytrzymałościowe tego stopu wyznaczone w warunkach próby monotonicznego rozciągania (tab. 1) oraz próby przy cyklicznym obciążeniu zmiennym (tab. 2).

Tabela 1. Własności wytrzymałościowe stopu D16CzATW wyznaczone w warunkach próby monotonicznego rozciągania

R_m , MPa	R_e , MPa	$R_{p0.2}$, MPa	E , MPa	A , %	Z , %
460	336	613	68 402	25,2	28,7

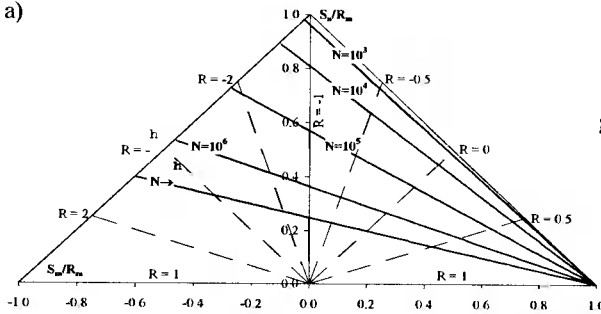
Tabela 2. Własności wytrzymałościowe stopu D16CzATW wyznaczone w warunkach próby przy cyklicznym obciążeniu zmiennym

Obciążenie	Równanie Wöhlera		Granica zmęczenia MPa	Teoretyczna graniczna liczba cykli
wahadłowe $R = -1$	$\sigma^{m_0} \cdot N = C$	$m_0 = 4,7916$	$Z_{rc} = 71,5$	$N_0 = 6\ 383\ 925$
		$C_0 = 4\ 892\ 225,5 \cdot 10^9$		
jednostronne $R = 0$	$\sigma^m \cdot N = C$	$m = 5,3107$	$Z_{r1} = 113,2$	
		$C = 516\ 682\ 294,3 \cdot 10^9$		

3. CHARAKTERYSTYKI ZMĘCZENIOWE

Na podstawie zamieszczonych powyżej własności wytrzymałościowych opracowano uogólnione charakterystyki zmęczeniowe. Przedstawiono je wraz z opisującymi je równaniami na rysunku 1.

a)



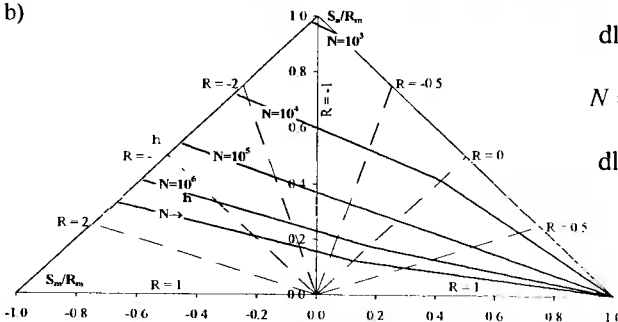
$$\frac{S_a}{460} = \left(1 - \frac{S_m}{460}\right) \cdot [A_0 + \gamma \cdot (1 - A_0)]$$

gdzie:

$$\gamma = \frac{S_m}{460 + 940,444 \cdot (\log N)^4}$$

$$A_0 = \frac{1 + 0,0031 \cdot (\log N)^4}{1 + 0,003 \cdot (\log N)^4 + 0,0031 \cdot (\log N)^4}$$

b)



dla zakresu $0 < R \leq 1,0$:

$$N = \left[\frac{4,09 \cdot (460 + S_a - S_m)}{S_a \cdot (1 + \psi_N)} \right]^{4,7916}$$

dla zakresu $-\infty < R \leq 0$:

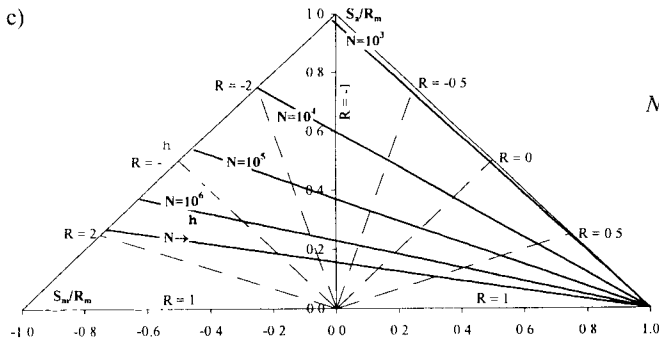
$$N = \frac{4,9 \cdot 10^{15}}{(S_a + \psi_N \cdot S_m)^{4,7916}}$$

gdzie:

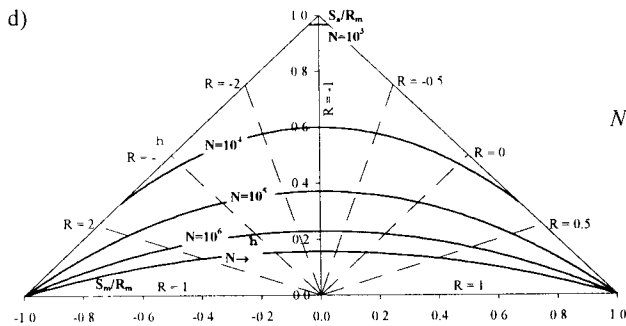
$$\psi_N = 1,738 \cdot N^{-0,0204} - 1$$

Rys. 1. Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe dla stopu D16CzATW:

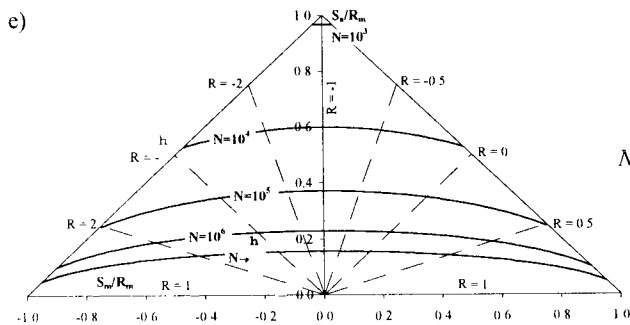
a) Heywooda, b) Model I, c) Model II, d) Model III, e) Model IV, f) Model V



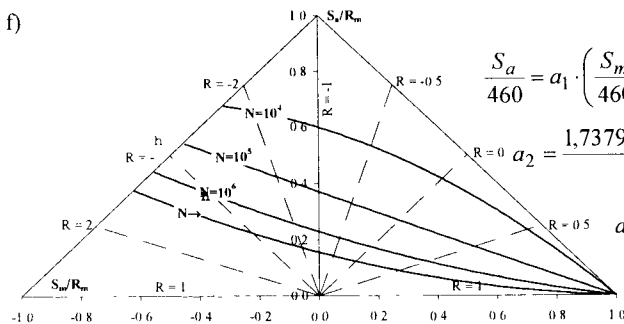
$$N = \left[\frac{1881,56}{S_a} \cdot \left(1 - \frac{S_m}{460} \right) \right]^{4,7916}$$



$$N = \left[\frac{1881,56}{S_a} \cdot \left(1 - \left(\frac{S_m}{460} \right)^2 \right) \right]^{4,7916}$$



$$N = \left[\frac{1881,56}{S_a} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{S_m}{460} \right)^2} \right]^{4,7916}$$



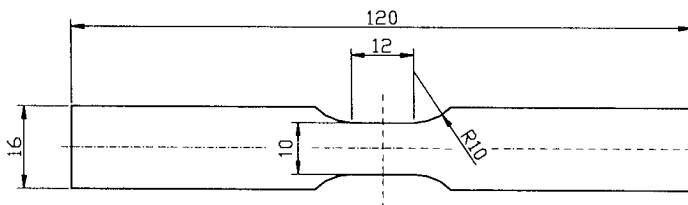
$$\frac{S_a}{460} = a_1 \cdot \left(\frac{S_m}{460} \right)^2 + a_2 \cdot \frac{S_m}{460} + 4,0890 \cdot N^{-0,2087}$$

$$a_2 = \frac{1,7379 \cdot N^{-0,0204} + 0,0045 \cdot N^{-0,2087} - 1}{2,3529 \cdot N^{-0,1883} - 1}$$

$$a_1 = (1 - a_2) \cdot \frac{0,5629}{N^{-0,2291}} - \frac{0,9782}{N^{-0,2087}}$$

4. PRÓBKI DO BADAŃ WERYFIKACYJNYCH

Badania weryfikacyjne przeprowadzono na próbkach płaskich o przekroju prostokątnym i grubości $g = 3,85$ mm, wykonanych zgodnie z PN-74/H-04327 (rys. 2).



Rys. 2. Wymiary próbek do badań weryfikacyjnych

5. BADANIA WERYFIKACYJNE DLA OBCIĄŻENIA STAŁOAMPLITUDOWEGO

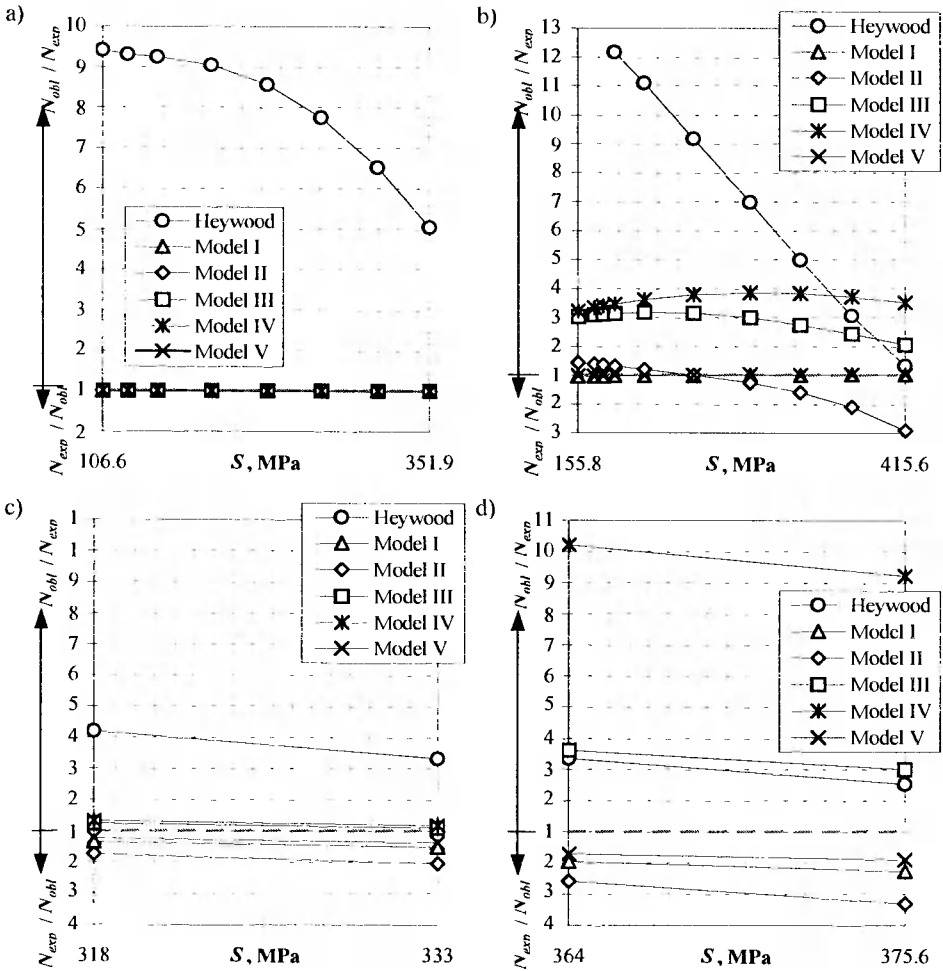
Badania doświadczalne przeprowadzono dla dwóch wartości współczynnika asymetrii cyklu: dla obciążenia jednostronnego o $R = 0$ (10 poziomów obciążenia w zakresie naprężenia nominalnego w części roboczej próbki $S = 155,8 \div 415,6$ MPa) oraz dla obciążenia wahadłowego o $R = -1$ (9 poziomów obciążenia w zakresie $S = 106,6 \div 351,9$ MPa). Dodatkowo wykonano badania dla obciążenia o wartości współczynnika asymetrii cyklu $R = -0,5$ oraz $R = 0,5$ (po 2 poziomy). Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej [3] za pomocą dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych w zestawieniu z wynikami weryfikacyjnych badań doświadczalnych przedstawiono na rysunku 3.

Jako wskaźnik zgodności wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych przyjęto stosunek średniej trwałości zmęczeniowej wyznaczonej eksperymentalnie N_{exp} do trwałości obliczeniowej N_{obl} lub odwrotność tego stosunku.

Ponieważ wszystkie charakterystyki, za wyjątkiem modelu Heywooda, oparte są na wykresie zmęczeniowym otrzymanym dla obciążenia wahadłowego o $R = -1$, więc dla tego szczególnego przypadku uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń i badań doświadczalnych (rys. 3a). W przypadku charakterystyki Heywooda obliczona trwałość zmęczeniowa była większa od 5,05 razy (dla wyższych poziomów obciążenia) do 9,4 razy (dla niższych poziomów obciążenia) od trwałości eksperymentalnej.

Podobnie wysoką zgodność wyników obliczeń z wynikami badań weryfikacyjnych dla obciążenia stałoamplitudowego o $R = 0$ prezentują charakterystyki zmęczeniowe utworzone zgodnie z Modelem I oraz Modelem V (rys. 3b).

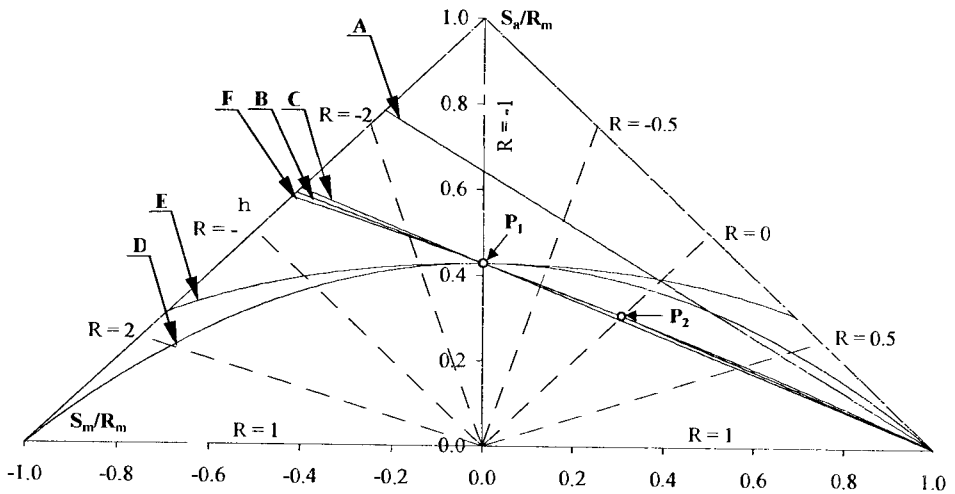
Określenia dokładności szacowania trwałości zmęczeniowej przez poszczególne charakterystyki dla innych wartości współczynnika asymetrii cyklu dokonać można na podstawie wyników badań eksperymentalnych dla obciążenia stałoamplitudowego o $R = -0,5$ (rys. 3c) oraz $R = 0,5$ (rys. 3d). W obu przypadkach po bezpiecznej stronie leżą wyniki dla charakterystyk utworzonych na podstawie Modelu I, Modelu II oraz Modelu V, przy czym najbliższe wynikom eksperymentalnym są wyniki obliczeń uzyskane na podstawie tej ostatniej charakterystyki. Podobnie jak w przypadku obciążenia o $R = -1$ i $R = 0$, również dla $R = -0,5$ największe rozbieżności wykazuje charakterystyka Heywooda, przy $R = 0,5$ dużym błędem obarczone są również wyniki dla charakterystyk zgodnych z Modelem III i Modelem IV.



Rys. 3. Zestawienie wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej przy obciążeniu stałoamplitudowym z wynikami badań weryfikacyjnych dla różnych wartości współczynnika asymetrii cyklu: $R = -1$ (a), $R = 0$ (b), $R = -0,5$ (c) oraz $R = 0,5$ (d)

Powód rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń trwałości zmęczeniowej otrzymanych dla poszczególnych charakterystyk dwuparametrycznych wyjaśnić można korzystając z rysunku 4. Przedstawia on linie stałej trwałości zmęczeniowej dla poszczególnych modeli obliczeniowych otrzymane dla trwałości $N = 50\ 000$ cykli.

Linie wykresowe otrzymane dla charakterystyki wg Modelu I (B) oraz Modelu V (F) przechodzą przez punkty P_1 oraz P_2 , posiadają w przybliżeniu prostoliniowy przebieg i w większości pokrywają się. Tak więc szacowanie trwałości zmęczeniowej dla obciążenia stałoamplitudowego $R = 0$ dla tych modeli musi być najdokładniejsze. Założyć można w związku z tym, iż podobnie wysoka zgodność występować będzie dla obciążeń stałoamplitudowych o wartościach współczynnika asymetrii cyklu R znajdujących się w otoczeniu punktów P_1 i P_2 .



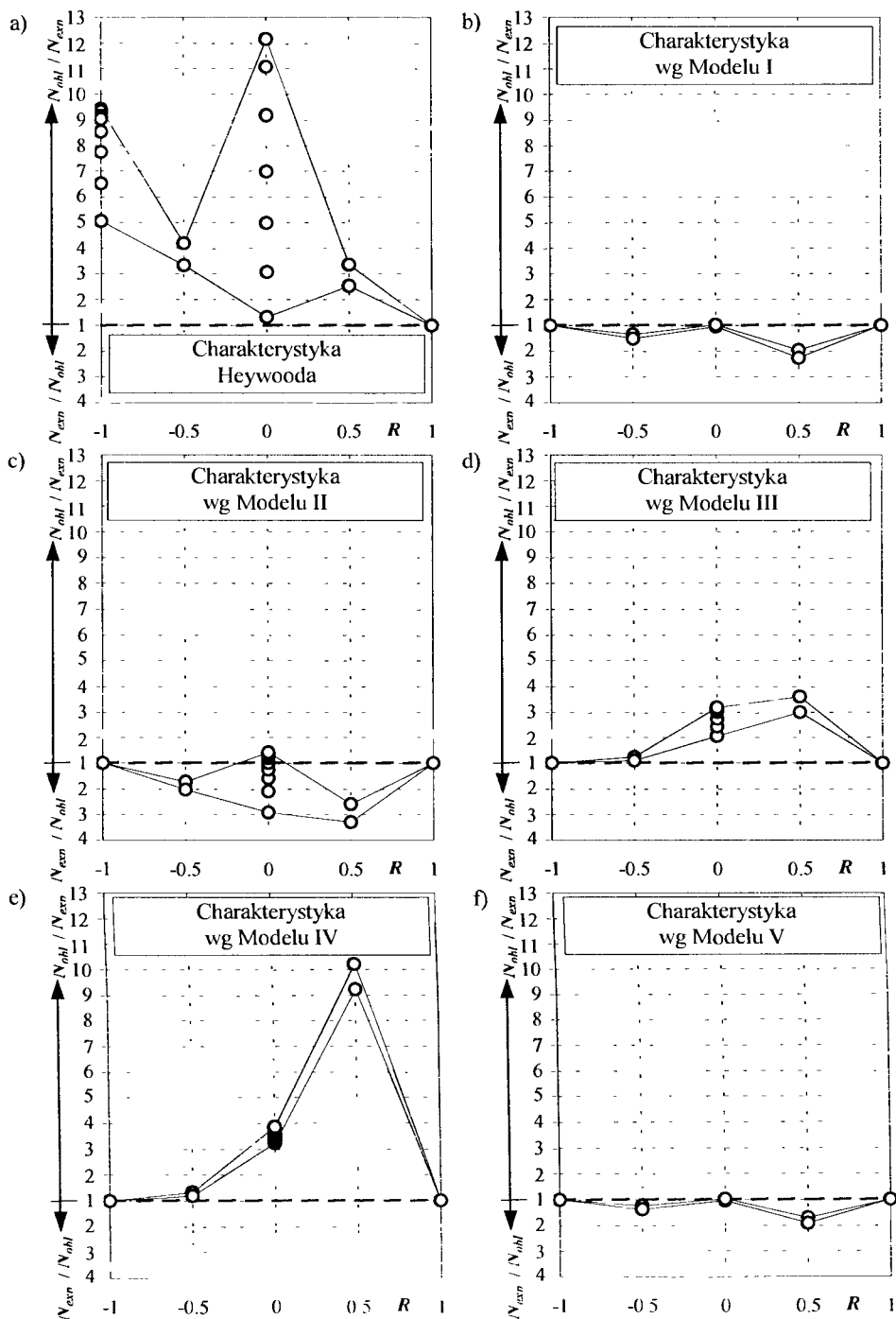
Rys. 4. Porównanie położenia linii stałej trwałości zmęczeniowej dla liczby cykli $N = 50\,000$ dla dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych otrzymanych dla stopu D16CzATW (literami oznaczono charakterystyki: A – Heywooda, B – Model I, C – Model II, D – Model III, E – Model IV, F – Model V)

Linia wykresowa dla charakterystyki wg Modelu II (C) jest linią prostą zbliżoną do przebiegu krzywych B i F. Błąd szacowania w przypadku tej charakterystyki utożsamiać można z wielkością odstępstwa jej liniowego przebiegu od krzywych B i F (reprezentujących w tym przypadku najlepszą zgodność wyników obliczeń i badań weryfikacyjnych). Jak widać z rysunku 3b krzywe te przecinają się dla obciążenia, dla którego S wynosi ok. 250 MPa. Dla niższych wartości punkt P_2 znajdować się będzie poniżej krzywej C (szacowana trwałość będzie wyższa), natomiast dla wartości wyższych powyżej krzywej (szacowana trwałość będzie niższa).

W przypadku charakterystyk wg Modelu III (D) oraz Modelu IV (E) linie zawsze leżą powyżej punktu P_2 , w związku z czym szacowana trwałość będzie większa niż trwałość eksperymentalna. Wynika to z narzuconej postaci równań wyjściowych do utworzenia charakterystyki dwuparametrycznej: symetrycznej względem osi S_a/R_m paraboli Gerbera (D) i elipsy (E).

Obserwując wykresy przedstawiające stosunek trwałości zmęczeniowej obliczonej do wyznaczonej eksperymentalnie (rys. 3) zauważyć można, iż dla niektórych charakterystyk stosunek ten zmienia się w dosyć dużych granicach. Związane to jest z przebiegiem danej charakterystyki w określonym zakresie współczynnika asymetrii cyklu R . Na rysunku 5 zamieszczono wartości stosunków N_{obl}/N_{exp} lub ich odwrotności dla wszystkich poziomów obciążenia otrzymanych dla różnych wartości współczynnika R , dodatkowo ograniczone liniami prezentującymi ich minimalne i maksymalne wartości, a więc prezentujące wielkość błędu szacowania trwałości zmęczeniowej dla obciążenia o określonej wartości współczynnika asymetrii cyklu R . Wyniki uzupełniono o punkt dla $R = 1$, odpowiadający zniszczeniu w warunkach próby monotonicznego rozciągania.

Jak można zauważyć, najlepiej w całym rozpatrywanym zakresie od $R = -1$ do $R = 1$ sprawdzają się charakterystyki utworzone wg Modelu I oraz Modelu V.



Rys. 5. Błąd szacowania trwałości zmęczeniowej na podstawie poszczególnych charakterystyk w zależności od wartości współczynnika asymetrii cyklu R

Obie charakterystyki szacują trwałość zmęczeniową po bezpiecznej stronie, tzn. trwałość zmęczeniowa jest niższa niż wyznaczona eksperymentalnie, przy czym na podstawie charakterystyki wg koncepcji parabolicznej uzyskuje się nieznacznie lepsze przybliżenie wyników obliczeń do wyników badań doświadczalnych.

W przypadku charakterystyki wg Modelu II otrzymane wyniki charakteryzują się znacznie większym rozrzutem, szczególnie w otoczeniu $R = 0$, przy czym dla tej charakterystyki, jak i dla innych, dokładne zbadanie zachowania się w otoczeniu $R = -0,5$ oraz $R = 0,5$ wymagałoby dokonania badań również dla niższych i wyższych poziomów obciążenia, niż przyjęte jedynie jako weryfikacyjne w tej pracy.

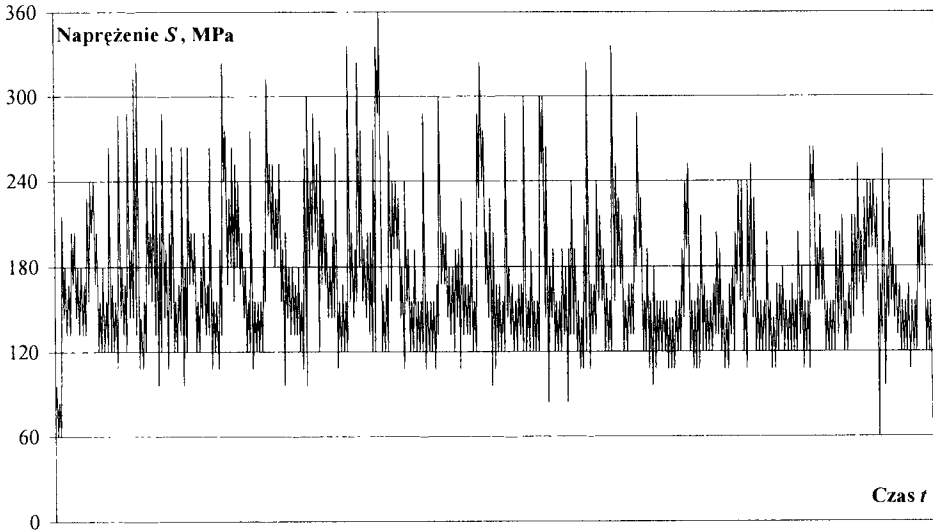
Zakres zastosowania charakterystyki zarówno wg Modelu III, jak i Modelu IV ogranicza się w zasadzie jedynie do zakresu $-1 \leq R \leq -0,5$, gdyż wraz ze wzrostem współczynnika R wyraźnie wzrasta błąd szacowania trwałości zmęczeniowej. Jest on związany z równaniem opisującym daną charakterystykę, wymuszającym paraboliczny lub eliptyczny przebieg linii $N = \text{const}$ symetrycznej względem osi S_u / R_m . Maksymalne wartości błędów osiągają obie charakterystyki dla $R = 0,5$, co można skorelować z ich przebiegiem przedstawionym na rysunku 4. Jednakże zdecydowanie gorzej sprawdza się charakterystyka wg Modelu IV, szacując wartości 2,5 razy większe niż charakterystyka wg Modelu III i ponad 10 razy większe niż trwałość eksperymentalna. Rysunek 5a zdecydowanie potwierdza wcześniejsze spostrzeżenia co do charakterystyki Heywooda.

6. BADANIA WERYFIKACYJNE DLA OBCIĄŻENIA EKSPLOATACYJNEGO

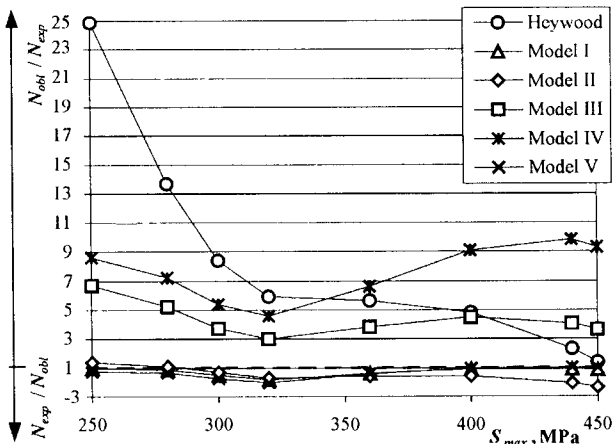
Badania weryfikacyjne możliwości zastosowania poszczególnych charakterystyk do wyznaczania trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych przeprowadzono dla obciążenia eksploatacyjnego przyjętego na podstawie standaryzowanego przebiegu czasowego naprężeń Falstaff nr 130 [2] (rys. 6). Przebieg ten stanowi standardowe obciążenie skrzydeł dla myśliwców i odnosi się do dolnego pokrycia skrzydła samolotu w pobliżu kadłuba. Został on zarejestrowany podczas lotu samolotu wojskowego, w którym wykonywano „ciężkie” manewry bez powtarzania figur (np. manewry bojowe). Czas rejestracji przebiegu wynosił 56 s. Liczba nawrotów obciążenia występująca w rozpatrywanym przebiegu wynosiła $2N_f = 560$. Przebieg ten poddano schematyzacji metodą Rainflow. Otrzymane zbiory cykli i półcykli mieściły się w zakresie współczynnika asymetrii cyklu $R = 0,167 \div 0,870$.

Obliczenia trwałości zmęczeniowej [3] przeprowadzono w oparciu o hipotezę kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrena-Minera [4] dla 9 poziomów obciążenia maksymalnego w przebiegu eksploatacyjnym ($S_{max} = 250 \div 450$ MPa), odpowiadających poziomom wykorzystanych do weryfikacji wyników badań eksperymentalnych. Poszczególne przypadki przebiegu naprężeń oparte o wymieniony powyżej przebieg Falstaff uzyskano poprzez skalowanie względem maksymalnej wartości naprężenia nominalnego S_{max} występującego w przebiegu eksploatacyjnym.

Wyniki obliczeń w postaci wartości stosunków N_{obl} / N_{exp} lub ich odwrotności zamieszczono na rysunku 7. Zarówno dla charakterystyki wg Modelu I, jak i wg Modelu V wyniki obliczeń są najbliższe wynikom badań eksperymentalnych, przy czym znajdują się one po bezpiecznej stronie. Nieznacznie lepszą zgodność uzyskano w przypadku charakterystyki wg Modelu V. Dla charakterystyki wg Modelu II błąd obliczeń wzrasta wraz ze wzrostem wartości maksymalnej naprężenia w przebiegu eksploatacyjnym.



Rys. 6. Przykładowy przebieg eksploatacyjny wg Falstaffa (nr 130) [2] dla maksymalnej wartości naprężenia $S_{max} = 360$ MPa



Rys. 7. Błąd szacowania trwałości zmęczeniowej na podstawie poszczególnych charakterystyk w zależności od maksymalnej wartości naprężenia S_{max} przebiegu eksploatacyjnego

Charakterystyki wg Modelu III i wg Modelu IV potwierdzają swoją niską skuteczność w szacowaniu trwałości zmęczeniowej dla współczynnika $R > -0,5$. W przypadku charakterystyki Heywooda uzyskane wyniki ponownie wskazują na brak jej przydatności do obliczeń trwałości zmęczeniowej.

7. PODSUMOWANIE

Dla rozpatrywanego w pracy stopu aluminium D16CzATW oraz obciążenia znajdującego się w przedziale wartości współczynnika asymetrii cyklu $-1 \leq R < 1$ najbardziej

zgodną z wynikami badań weryfikacyjnych trwałość zmęczeniową szacowano na podstawie charakterystyk dwuparametrycznych utworzonych wg Modelu I oraz wg Modelu V, w oparciu o stałe materiałowe otrzymane na podstawie wykresów zmęczeniowych dla obciążenia $R = -1$ (m_0, C_0) oraz dla $R = 0$ (m, C), jak również stałej materiałowej (R_m), uzyskanej na podstawie próby monotonicznego rozciągania. Ze względu na znaczne zawyżanie trwałości zmęczeniowej zakres zastosowania charakterystyk utworzonych zgodnie z Modelem III oraz Modelem IV należałoby ograniczyć do przedziału współczynnika asymetrii cyklu $-1 \leq R \leq 0,5$. Najmniej skuteczna w obliczeniach okazała się charakterystyka Heywooda, na co znaczący wpływ miał fakt uwzględnienia w modelu matematycznym jedynie stałej materiałowej otrzymanej na podstawie próby monotonicznego rozciągania (R_m), przy jednoczesnym braku odniesienia do zmęczeniowych własności materiałowych.

LITERATURA

- [1] Lipski A., Szala J.: Opis własności zmęczeniowych materiałów z uwzględnieniem zmienności współczynnika asymetrii cyklu obciążenia sinusoidalnego. Materiały XX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska 2004.
- [2] Description of a Fighter Aircraft Loading Standard for Fatigue. ICAF, 1976.
- [3] Lipski A.: Analiza wpływu rozkładów odkształceń i naprężeń na trwałość zmęczeniową złożonych elementów konstrukcyjnych. Praca doktorska, Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 2003.
- [4] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN, Warszawa 1997.