

SOŁTYSIAK Robert, LIGAJ Bogdan, LIPSKI Adam

WPLYW MODUŁU YOUNGA NA OPIS WŁASNOŚCI CYKLICZNYCH MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH

Streszczenie

W pracy poddano dyskusji wartości modułu sprężystości wzdłużnej (modułu Younga) używanego do opisu części sprężystej w modelu Ramberga-Osgooda R-O. Pod uwagę wzięto dwa rodzaje modułów Younga: statyczny E_{st} wyznaczony na podstawie standardowej próby rozciągania próbek oraz cykliczny E_c wyznaczony na podstawie pętli histerezy otrzymanej podczas badań zmęczeniowych przy sterowaniu odkształceniem dla następujących okresów trwałości zmęczeniowej: 0.1N, 0.5N i 0.9N. Dodatkowo w pracy przedstawiono przykładowe pętli histerezy z wybranych okresów trwałości zmęczeniowej oraz wybranych poziomów zmiennej sterującej.

WSTĘP

Katastrofy obiektów technicznych spowodowane zmęczeniem, to ciągle aktualne zagrożenie pomimo wieloletnich badań nad tym zagadnieniem. Jak wynika z danych literaturowych, 60% katastrof drogowych, spowodowanych było pęknięciami zmęczeniowymi [19]. W ocenie specjalistów zastosowanie wiedzy z zakresu zmęczenia mogłoby zredukować straty spowodowane pęknięciami zmęczeniowymi do ok. 30% kosztów, które ponosi się obecnie. Kosztów związanych z życiem ludzkim nie da się określić [4].

W praktyce inżynierskiej stosuje się różne metody projektowe mające za zadanie przeciwdziałać zmęczeniowemu pękaniu. Ogólnie można je podzielić na trzy podstawowe grupy: metody o podejściu globalnym, podejściu lokalnym oraz metody mechaniki pękania [6, 11]. Niezbędnym etapem obliczeń poszczególnych metod projektowych jest użycie odpowiedniego modelu materiałowego opisującego własności materiału w danych warunkach eksploatacyjnych. Jednym z najczęściej używanych modeli materiałowych opisujących zachowanie się materiałów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń zmiennych jest sprężysto-plastyczny model Ramberga-Osgooda (R-O) [12]:

$$\varepsilon_{ac} = \varepsilon_{as} + \varepsilon_{apl} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (1)$$

gdzie: ε_{ac} - amplituda odkształcenia całkowitego, ε_{as} - amplituda odkształcenia sprężystego, ε_{apl} - amplituda odkształcenia plastycznego, σ_a - amplituda naprężenia, E - moduł Younga, n' - wykładnik cyklicznego umocnienia, K' - cykliczny współczynnik wytrzymałości.

Analiza danych literaturowych [5, 7, 13, 14] wskazuje na powszechne stosowanie w obliczeniach zmęczeniowych modułu Younga określonego dla standardowej próby rozciągania [10]. Moduł ten wyznacza się z danych eksperymentalnych naprężenia (siła przez

przekrój) w funkcji odkształcenia. W przypadku materiałów o liniowym odcinku sprężystym moduł ten jest współczynnikiem kierunkowym prostej opisującej liniowy (proporcjonalny) zakres własności materiału. Moduł ten na potrzeby niniejszej pracy nazwano statycznym modułem Younga E_{st} .

Wyniki badań zawarte między innymi w pracach [3, 15] pozwalają wyróżnić również moduł opisujący sprężyste zachowanie się materiału w warunkach obciążeń zmiennych stałoamplitudowych. Moduł ten na potrzeby pracy nazwano cyklicznym modułem Younga E_c . W odróżnieniu od statycznego moduły Younga, moduł cykliczny wyznaczany jest na podstawie analiz pętli histerezy rejestrowanych w czasie badań zmęczeniowych [3].

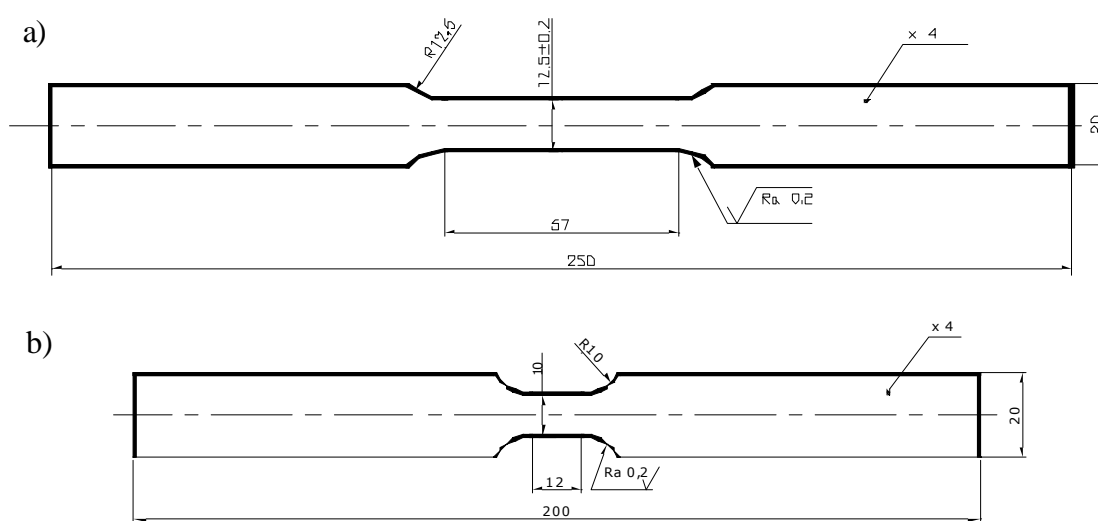
Dane literaturowe [3] oraz badania własne [15] wskazują na występowanie istotnych różnic pomiędzy wartościami statycznego i cyklicznego modułu Younga. W niniejszej pracy przedstawiono wpływ wartości modułu Younga na opis cyklicznych własności materiałowych przy użyciu sprężysto-plastycznego modelu Ramberga-Osgooda.

1. OBIEKT I PROGRAM BADAŃ

Badania doświadczalne dla stopu aluminium 2024-T3 przeprowadzono w warunkach obciążeń monotonicznych oraz zmiennych stałoamplitudowych [9]. Materiał ten stosowany jest na elementy konstrukcyjne: samolotów, środków transportu itp. Skład chemiczny badanego materiału przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Skład chemiczny stopu aluminium 2024-T3 wyrażony w % [16]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,06	0,16	4,70	0,63	1,50	0,01	0,16	0,03



Rys. 1. Geometria próbek do badań: a - statycznego rozciągania, b - zmęczeniowych

Próbki do badań pobrano z blachy o grubości 4 mm w ten sposób, że ich oś pokrywała się z kierunkiem walcowania blach. Geometrię próbek do badań w warunkach statycznego rozciągania przygotowano zgodnie z normą [18] (Rys. 1a), natomiast do badań w warunkach obciążeń zmiennych stałoamplitudowych według normy [17] (Rys. 1b). Doświadczenie realizowano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8501, która jest na wyposażeniu Instytutowego Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Wymienione Laboratorium posiada akredytację Polskiego Centrum Akredytacji nr AB 372.

Badania zmęczeniowe stopu aluminium 2024-T3 przeprowadzono w warunkach obciążeń zmiennych stałoamplitudowych o współczynniku asymetrii cyklu $R = -1$ przy sterowaniu odkształceniem. Parametrem sterującym była wartość amplitudy odkształcenia całkowitego ϵ_{ac} ($\epsilon_{aci} = \text{const.}$). Testy zmęczeniowe przeprowadzono na pięciu poziomach ϵ_{ac} : 0.25%, 0.35%, 0.50%, 0.8%, i 1.0%.

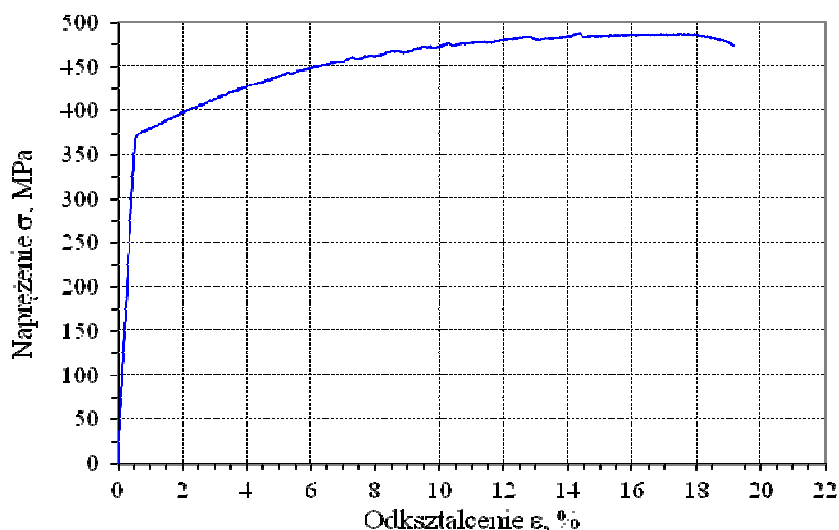
2. WYNIKI BADAŃ

2.1. Próba rozciągania

Po przeprowadzeniu próby rozciągania wyznaczono statyczne własności materiałowe. Wartości średnie z przeprowadzonej próby zestawiono w tabeli 2. Przykładowy wykres rozciągania przedstawiono na rysunku 2.

Tab. 2. Własności statyczne stopu aluminium 2024-T3 [2]

$R_{p0.2}$ MPa	R_m MPa	E_{st} MPa
374,8	488,3	67 560



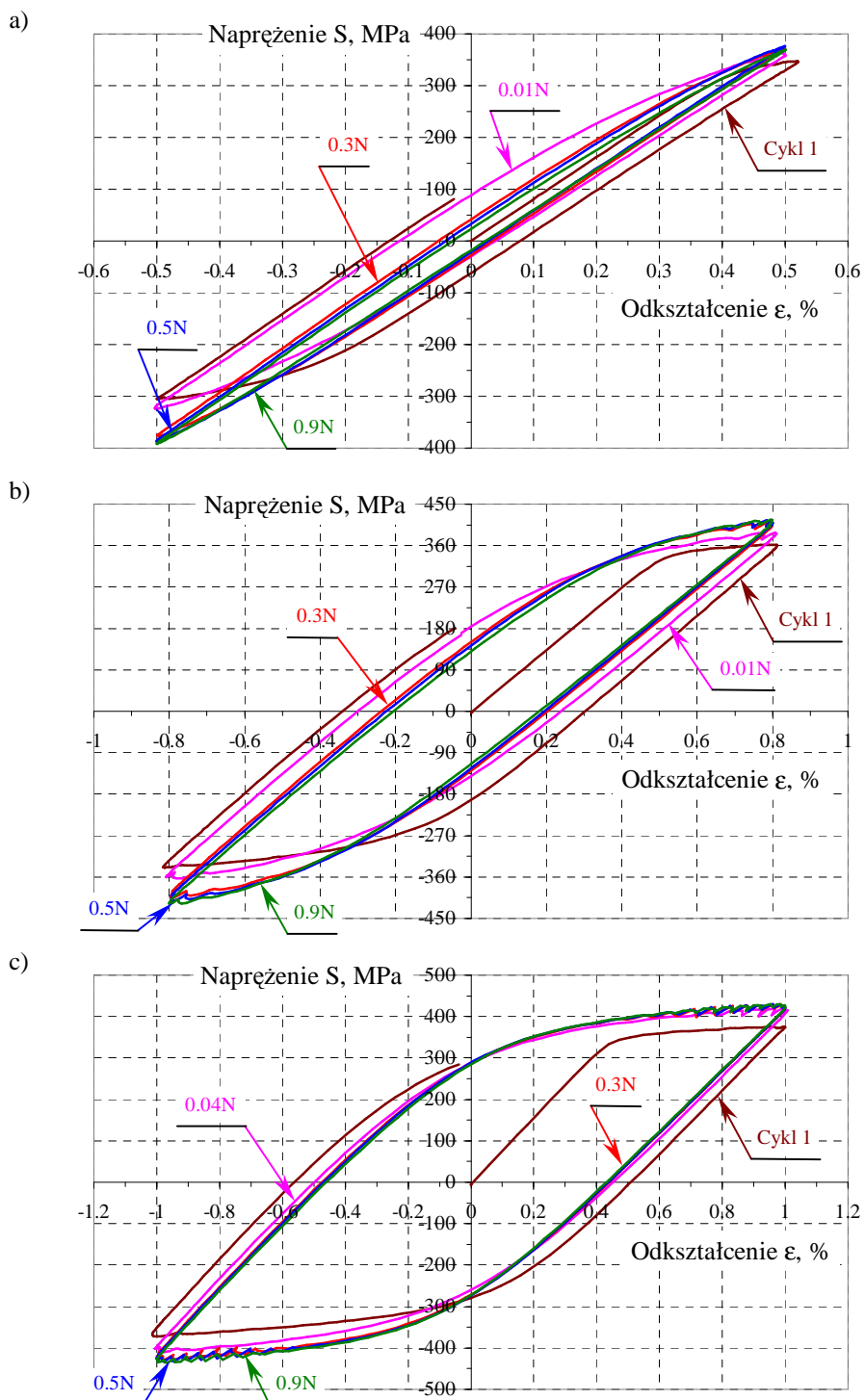
Rys. 2. Przykładowy wykres statycznego rozciągania dla próbki wykonanej z 2024-T3 [2]

2.2. Próba zmęczeniowa

Podczas realizacji badań pod obciążeniem zmiennym przeprowadzono pomiary wartości odkształceń i naprężeń próbek, co pozwoliło na wyznaczenie kształtu pętli histerezy. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe pętle histerezy dla $\epsilon_{ac} = 0.5\%$ (rys. 3a), $\epsilon_{ac} = 0.8\%$ (rys. 3b) i $\epsilon_{ac} = 1.0\%$ (rys. 3c). Na poszczególnych rysunkach znajduje się po pięć pętli histerezy pochodzących z różnych okresów trwałości zmęczeniowej. Pierwsza pętla odpowiada pierwszemu cyklowi obciążenia (cykl 1), natomiast kolejne pętli pobrane są z wybranych okresów trwałości zmęczeniowej odpowiadającej odpowiednio 0.01N lub 0.04N, 0,3N, 0,5N, 0,9N, gdzie N oznacza trwałość zmęczeniową badanej próbki.

Na podstawie przedstawionych pętli histerezy można zaobserwować brak stabilizacji własności materiału pod wpływem obciążeń zmiennych, co wynika ze zmian parametrów pętli. Zgodnie z normą [1] dla takich materiałów, do wyznaczania stałych materiałowych K' i n' , powinno korzystać się z wartości opisujących pętli histerezy pochodzące z połowy okresu trwałości zmęczeniowej 0,5N. Wyznaczone w ten sposób stałe materiałowe zestawiono w tabeli 3 natomiast wykres cyklicznego odkształcenia opisany równaniem R-O

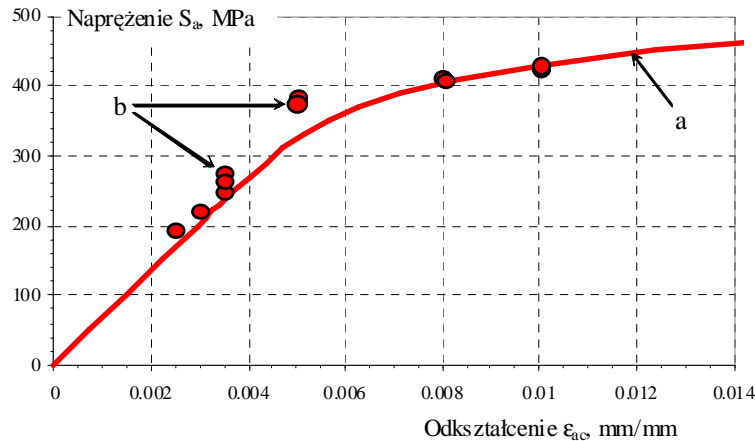
przedstawiono na rysunku 4, na którym zamieszczono punkty pochodzące z badań doświadczalnych. Składową odkształcenia sprężystego równania R-O opisano przy użyciu statycznego modułu Younga $E_{st} = 67\,560$ MPa.



Rys. 3. Przykładowe pętle histerezy dla stopu aluminium 2024-T3 dla poziomów amplitudy odkształcenia całkowitego: a) $\varepsilon_{ac} = 0.5\%$, b) $\varepsilon_{ac} = 0.8\%$, c) $\varepsilon_{ac} = 1.0\%$

Tab. 3. Wielkości charakteryzujące cykliczne własności materiałowe stopu aluminium 2024-T3

K' MPa	n' -	E_{st} MPa
749	0,0988	67 560

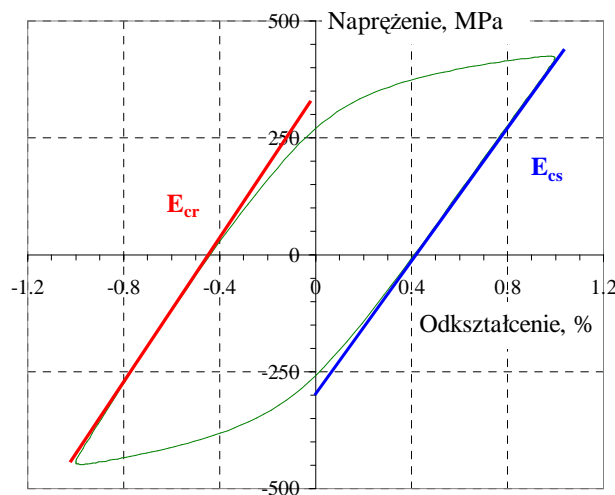


Rys. 4. Wykres cyklicznego odkształcenia opisany równaniem Ramberga-Osgooda (a) dla stopu aluminium 2024-T3 wyznaczonego na podstawie parametrów pętli histerezy z połowy okresu trwałości (0.5N) i statycznego modułu Younga na tle wyników badań doświadczalnych (b).

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

3.1. Analiza zmian cyklicznego modułu Younga pod kątem okresu trwałości

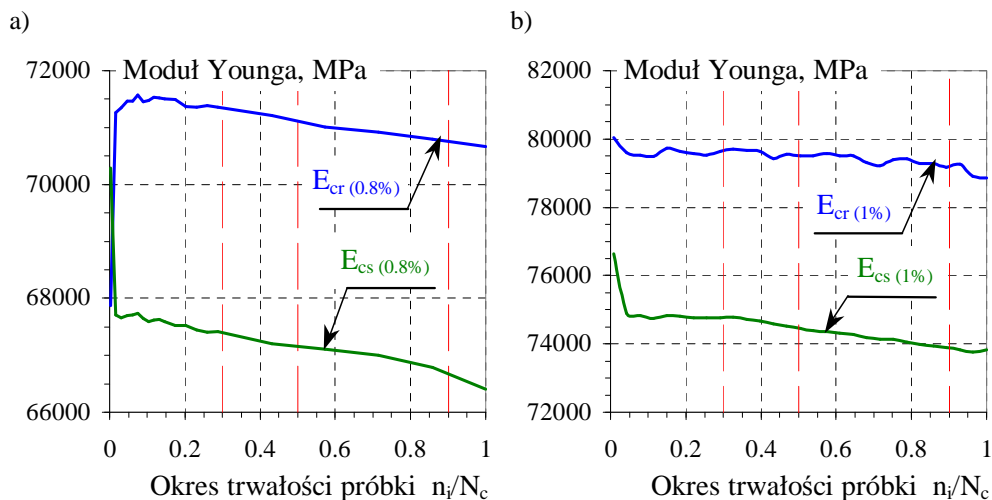
Cykliczny moduł Younga wyznaczono na podstawie liniowego odcinka pętli histerezy odpowiadającego półcyklowi rozciągającemu E_{cr} oraz półcyklowi ściskającemu E_{cs} . Schemat wyznaczania modułów cyklicznych przedstawiono na rysunku 5. W ten sposób dla poszczególnych pętli histerezy na wszystkich poziomach obciążeń wyznaczono wartości cyklicznego modułu Younga, co przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Schemat wyznaczania cyklicznego modułu Younga podczas półcyklu rozciągającego (E_{cr}) oraz ściskającego (E_{cs}) próbki

Przedstawione wykresy wskazują, że najwyższe wartości modułu uzyskano dla początkowego okresu trwałości próbki i wartość ta spada wraz ze wzrostem okresu trwałości. W całym okresie trwałości n_i/N_c wartość modułu $E_{cr} > E_{cs}$, co przedstawiono na rysunkach 6a i 6b. Dla innych poziomów ϵ_{ac} , na których realizowano badania, zaobserwowano podobny charakter zmian wartości. Dla amplitudy odkształcenia całkowitego $\epsilon_{ac} = 0.8\%$ zakres zmian wartości E_{cr} wynosi od ~ 67900 MPa do ~ 71500 MPa, natomiast wartości E_{cs} od ~ 66400 MPa do ~ 70300 MPa. Dla $\epsilon_{ac} = 1.0\%$ zakres zmian wartości E_{cr} wynosi od ~ 78900 MPa do

~80050 MPa, natomiast wartości E_{cs} od ~73800 MPa do ~76500 MPa. Pobieźna analiza wartości cyklicznego modułu Younga wskazuje na różnicę pomiędzy najniższą i najwyższą wartością (zakres zmian od ~66400 MPa do ~80050 MPa) wynoszącą około 14000 MPa.



Rys. 6. Przebieg zmian wartości modułu Younga dla wybranych poziomów amplitudy odkształcenia całkowitego: a) $\epsilon_{ac} = 0.8\%$, b) $\epsilon_{ac} = 1.0\%$

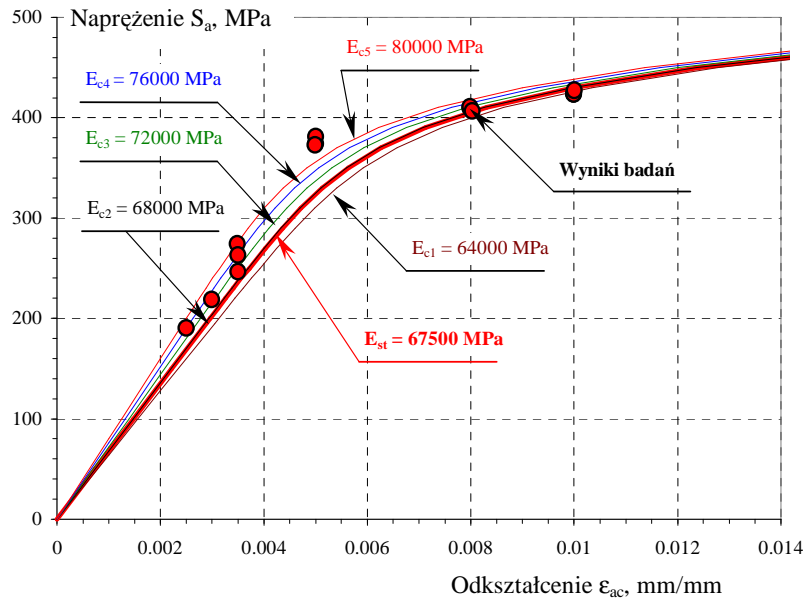
Wartości cyklicznego modułu Younga dla 0.5N (dla okresu trwałości, z którego pobrano dane do opracowania wykresu Ramberga-Osgooda (rys.4)) wynosiły: dla $\epsilon_{ac} = 0.8\%$ – $E_{cs} = 67100$ MPa i $E_{cr} = 71100$ MPa, dla $\epsilon_{ac} = 1.0\%$ – $E_{cs} = 74500$ MPa i $E_{cr} = 79500$ MPa. Na tej podstawie można stwierdzić, iż wartości E_{cs} i E_{cr} wyznaczone na podstawie pętli histerezy z połowy okresu trwałości były zbliżone i wyższe od wartości E_{st} , którą przyjęto do wyznaczenia wykresu R-O.

3.2. Wpływ zmiennej wartości modułu Younga na wykres cyklicznego odkształcenia

W celu określenia wpływu wartości modułu Younga na wykres cyklicznego odkształcenia opisany równaniem R-O przyjęto pięć wartości z zakresu od 64000 MPa do 80000 MPa ($E_{c1} = 64000$ MPa, $E_{c2} = 68000$ MPa, $E_{c3} = 72000$ MPa, $E_{c4} = 76000$ MPa, $E_{c5} = 80000$ MPa). Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 3 (tj. n' i K') oraz przyjętych wartości modułu Younga ($E_{c1} - E_{c5}$), korzystając z równania (1), wyznaczono wykresy R-O, które przedstawiono na rysunku 7. Dla porównania na wymienionym rysunku zamieszczono również wykres opisany równaniem R-O wyznaczony z użyciem statycznego modułu Younga oraz wyniki badań doświadczalnych.

Pobieźna analiza położenia wykresów R-O względem wyników badań doświadczalnych wskazuje na lepsze dopasowanie wykresu cyklicznego odkształcenia do wyników eksperymentu dla przyjętych wartości $E \geq 72000$ MPa.

Zmieniająca się wartość modułu Younga materiału poddanego obciążeniom cyklicznym znacznie utrudnia opis matematyczny jego własności mechanicznych. Zastosowanie statycznego modułu Younga w równaniu R-O powoduje w większości przypadków zaniżenie wartości amplitudy naprężeń S_a dla odpowiadającej im wartości amplitudy odkształcenia całkowitego ϵ_{ac} (Tab. 4). Ma to znaczenie w kontekście wykonywanych obliczeń trwałości zmęczeniowej metodą hybrydową [8].



Rys. 7. Wykresy cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda wyznaczone dla przyjętych wartości modułu Younga na tle wykresu dla danych doświadczalnych

Tab. 4. Wartości amplitud naprężeń S_a obliczone dla przyjętych wartości modułów Younga

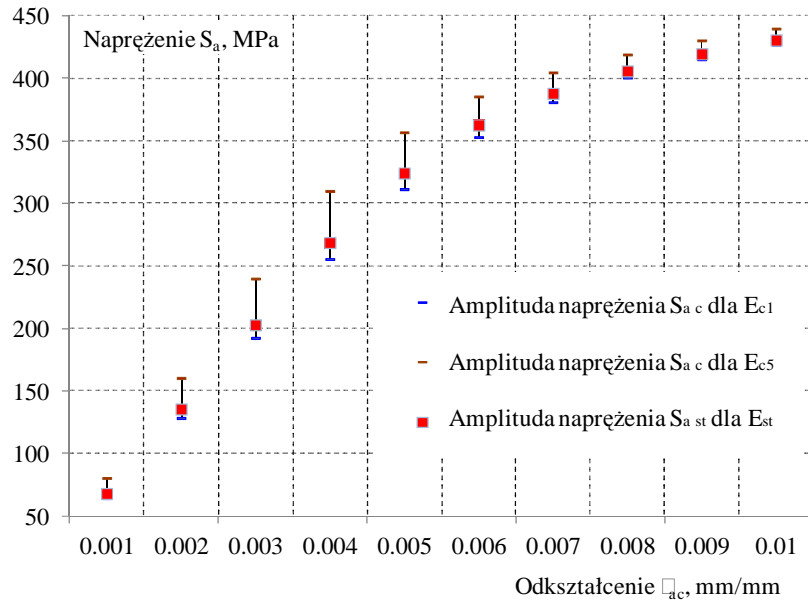
Odkształcenie ϵ_{ac} , mm/mm	Amplituda naprężeń S_a , MPa					
	$E_{c1} =$ 64000 MPa	$E_{c2} =$ 68000 MPa	$E_{c3} =$ 72000 MPa	$E_{c4} =$ 76000 MPa	$E_{c5} =$ 80000 MPa	$E_{st} =$ 67500 MPa
1	2	3	4	5	6	7
0.001	64.0	68.0	72.0	76.0	80.0	67.6
0.002	128.0	136.0	144.0	152.0	160.0	135.1
0.003	192.0	204.0	216.0	227.5	239.5	202.5
0.004	255.0	270.0	284.0	297.5	309.5	268.2
0.005	311.0	325.5	337.5	348.0	356.5	323.9
0.006	352.6	363.2	372.0	379.0	385.0	362.3
0.007	380.5	388.2	394.6	399.9	404.4	387.6
0.008	400.1	406.0	411.0	415.2	418.7	405.5
0.009	414.8	419.6	423.7	427.1	430.0	419.2
0.01	426.5	430.5	433.9	436.8	439.4	430.2

Różnice wartości amplitud naprężeń S_a przeliczonych na podstawie równania R-O dla dwóch skrajnych cyklicznych modułów Younga (E_{c1} i E_{c5}) w porównaniu do amplitud naprężeń wyznaczonych przy użyciu statycznego modułu Younga E_{st} przedstawiono na rysunku 8. Największe różnice w wartościach S_{ac} w porównaniu do S_{ast} wyznaczonych przy użyciu statycznego modułu Younga E_{st} obserwujemy dla zakresu naprężeń mieszczącego się w obszarze wysokocyklowego zmęczenia, dla których konstrukcje ze stopu aluminium 2024-T3 są projektowane.

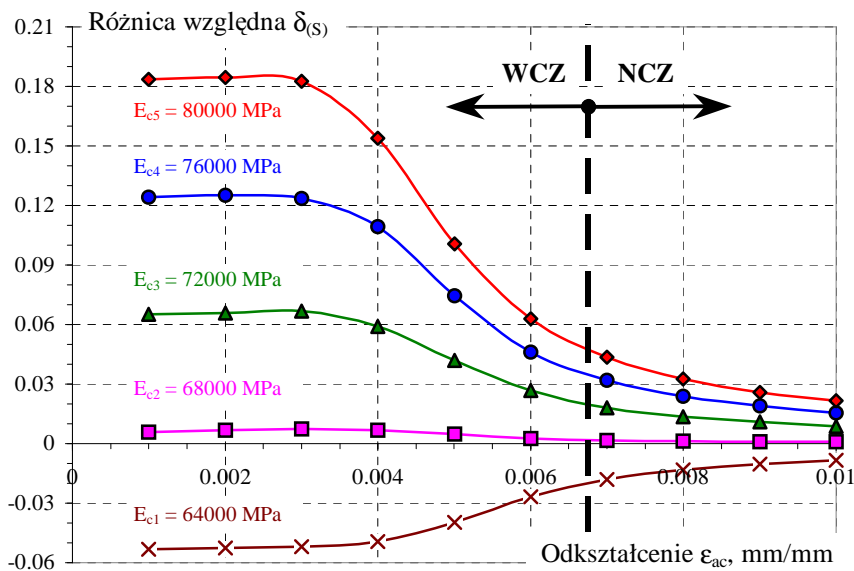
W celu ilościowego przedstawienia powstałych różnic wartości amplitudy naprężeń S_a odpowiadających poszczególnym wartościom ϵ_{ac} dla różnych wartości modułów Younga użyto wzór (2) określający różnicę względną:

$$\delta_{(s)} = \frac{S_{a(i)} - S_{ast}}{S_{ast}} \quad (2)$$

gdzie: $S_{a(i)}$ - wartość amplitudy naprężenia wyznaczona dla poszczególnych cyklicznych modułów Younga, S_{ast} - wartość amplitudy naprężenia wyznaczona dla statycznego modułu Younga.



Rys. 8. Różnice wartości amplitud naprężeń S_a przeliczonych na podstawie równania R-O dla E_{c1} , E_{c5} oraz E_{st}



Rys. 9. Wartość różnicy względnej $\delta_{(s)}$ dla przyjętych wartości modułu Younga

Na rysunku 9 przedstawiono zakres zmian wartości różnic względnych $\delta_{(s)}$. Z wykresu wynika, że największe różnice wartości obserwuje się dla naprężeń S_a mieszczącego się w obszarze wysokocyklowego zmęczenia. Jako kryterium podziału na obszary przyjęto wartość odkształceń ε odpowiadających granicy plastyczności $R_{p0.2}$. Sformułowane we wcześniejszej części pracy spostrzeżenie dotyczące dopasowania wykresu R-O do wyników badań doświadczalnych dla wartości $E \geq 72000$ MPa wskazuje, że różnica względna dla zakresu wysokocyklowego zmęczenia jest zależna od poziomu odkształcenia ε_{ac} i mieści się w granicach:

- dla $E_{c3} = 72000$ MPa od 0,065 ($\varepsilon_{ac} = 0,001$ mm/mm) do 0,02 ($\varepsilon_{ac} = 0,0067$ mm/mm),
- dla $E_{c4} = 76000$ MPa od 0,125 ($\varepsilon_{ac} = 0,001$ mm/mm) do 0,035 ($\varepsilon_{ac} = 0,0067$ mm/mm),
- dla $E_{c5} = 80000$ MPa od 0,184 ($\varepsilon_{ac} = 0,001$ mm/mm) do 0,05 ($\varepsilon_{ac} = 0,0067$ mm/mm).

Wartości $\delta_{(s)}$ dla $E_{cl} = 64000$ MPa, w całym zakresie zmienności ε_{ac} , przyjmują wartości ujemne. Różnice względne dla zakresu niskocyklowego zmęczenia mieszczą się w granicach:

- dla $\underline{\varepsilon}_{ac} = 0,0067$ mm/mm od $-0,05$ do $0,05$,
- dla $\underline{\varepsilon}_{ac} = 0,01$ mm/mm od $-0,01$ do $0,02$.

Przedstawione wyniki różnic względnych wskazują, iż przyjęcie w obliczeniach trwałości zmęczeniowej stopu aluminium 2024-T3 wykresu Ramberga-Osgooda wyznaczonego z zastosowaniem E_{st} może prowadzić do uzyskania niedokładnych wyników. Zakres niedokładności związany jest z postacią widma obciążenia.

WNIOSKI

Rozważane cykliczne moduły Younga (E_{cr} , E_{cs}) pod wpływem narastającej liczby cykli mają tendencję do obniżania swojej wartości. Może to mieć związek z procesem osłabiania lub umacniania się materiały poddanego obciążeniom cyklicznym, lecz wymaga to większej ilości badań przy różnych rodzajach obciążeń.

Zmieniająca się wartość cyklicznego modułu Younga dla stopu 2024-T3 podczas narastających obciążeń prowadzi do utrudnionego opisu własności materiałowych. Należy zwrócić uwagę, że problem ten dotyczy nie tylko zakresu powyżej granicy plastyczności (NCZ), ale głównie zakresu poniżej granicy plastyczności (WCZ).

Zastosowanie w obliczeniach trwałości zmęczeniowej hybrydowej metody obliczeń [8] wymaga zastosowania wykresu Ramberga-Osgooda służącego do określania wartości amplitud naprężeń S_a odpowiadających amplitudom odkształceń całkowitych ε_{ac} lub odwrotnie. Niedokładny opis własności cyklicznych materiałów może prowadzić do istotnych różnic w wartościach parametrów S_a (ε_{ac}), a tym samym wpływać na dokładność obliczeń zmęczeniowych.

Na podstawie przedstawionych wyników badań doświadczalnych można sformułować zalecenie praktyczne. W przypadku, gdy wyniki badań doświadczalnych wyznaczonych na podstawie pętli histerezy z $0.5N$ leżą poza linią opisującą wykres cyklicznego odkształcenia R-O należy sprawdzić wartość cyklicznego modułu Younga i porównać ją z wartością E_{st} . W przypadku wystąpienia różnic należy przyjąć wartość modułu, który daje „lepsze” dopasowanie wyników badań do modelu R-O.

BIBLIOGRAFIA

1. *Badania niskocyklowego zmęczenia metali*, PN-84 H-04334
2. Boroński D., Lipski A., Mroziński S., Szala J., *Metody doświadczalne w badaniach materiałów stosowanych na poszycia samolotów i połączeń nitowanych*, monografia pod redakcją J. Szala, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji PIB, 2010 Radom
3. Boroński D., *The effect of the method of determination of Young's modulus on the estimation of fatigue life of structural elements*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 42, 2, Warsaw 2004, 269-283
4. Duga J.J., et.al., *The Economic Effects of Fracture in the United States*, Part 2. A Report to NBS by Columbus Laboratories, 1983
5. *Fatigue Design Handbook*, II edition, Society of Automotive Engineering, 1988
6. Kocak M. et all, *FITNET, European Fitness for service Network 2006*, ISBN 987-3-940923-01-1, GKSS Research Centre Geesthacht GmbH
7. Kocańda S., Szala J., *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, Warszawa, 1991
8. Ligaj B., Szala G., *Hybrydowa metoda obliczeń trwałości zmęczeniowej*, monografia pod redakcją J. Szala, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2013

9. Lipski A., Niesłony A., *Porównanie charakterystyk zmęczeniowych blachy ze stopu aluminium 2024-T3 wyznaczonych metodą konwencjonalną i 3D*, XXIII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz – Pieczyńska, maj 2010, ss. 287-296.
10. *Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*, PN-EN ISO 6892-1:2010P
11. Radaj D., *Review of fatigue strength assessment of nonwelded and welded structures based on local parameters*, International Journal of Fatigue 18 No. 3 (1996), 153-170
12. Ramberg, W., Osgood, W. R., *Description of stress-strain curves by three parameters*, Technical Note No. 902, National Advisory Committee For Aeronautics, Washington DC 1943
13. Roessle M.L., Fatemi A., *Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations*, International Journal of Fatigue, 22, 2000, 495-511
14. Schijve J., *Fatigue of Structures and Materials*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001
15. Sołtysiak R., Ligaj B., Lipski A., *Wpływ statycznego i dynamicznego modułu Younga na zgodność wykresu Ramberga-Osgooda z wynikami badań doświadczalnych na przykładzie stopu aluminium 2024-T3*, XXV Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka, 2012
16. Sołtysiak R., *Local strain analysis in friction stir welded 2024-T3 aluminum joints under cyclic loading*, Journal of Polish CIMAC, vol. 5 no 3 (2010), ss. 193-20
17. *Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing*, ASTM E606-04
18. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM E8M-04
19. Szala J., *Europejskie procedury FITNET przykładem transformacji wiedzy w budowie i eksploatacji maszyn*, Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna 1/2008

INFLUENCE OF YOUNG'S MODULUS VALUE ON THE DESCRIPTION OF CYCLIC MATERIAL PROPERTIES

Abstract

This paper discusses the type of the longitudinal elastic modulus (Young's modulus) which is used to describe the elastic part of the R-O. Two types of Young's modules were considered: static E_{st} and cyclic E_c . The static module was determined on the basis of monotonic tensile tests of samples, while the dynamic module was determined on the basis of the hysteresis loop obtained during fatigue tests under strain control for the following periods of fatigue life: 0.1 N, 0.5 N and 0.9 N. The paper also presents the hysteresis loops selected from some periods of fatigue life.

*Badania doświadczalne przeprowadzono w ramach projektu badawczego specjalnego nr 61/EUR/2006/02
"Poprawa trwałości zmęczeniowej połączeń nitowanych stosowanych w konstrukcjach lotniczych"*

Wyniki opracowano w ramach pracy badawczej BSM-43/2012 "Cykliczne własności materiałowe mikropróbek"