

PRZYBLIŻONE WYZNACZANIE WYKRESU TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ W UJĘCIU ODKSZTAŁCENIOWYM BAZUJĄCE NA WYNIKACH PRÓBY ROZCIĄGANIA NA PRZYKŁADZIE STOPU ALUMINIUM 2024-T3

Adam LIPSKI*, Robert SOŁTYSIAK*

* Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

adlippkm@utp.edu.pl, robsol@utp.edu.pl

Streszczenie: W pracy opisano siedem metod przybliżonego wyznaczania wykresu trwałości zmęczeniowej w ujęciu odkształceniowym bazujących na wynikach próby rozciągania. Metody te zastosowano do wyznaczenia wykresu Morrowa dla stopu aluminium 2024-T3 w postaci blachy. Otrzymane wykresy porównano z wykresem doświadczalnym otrzymanym na podstawie badań niskocyklowych. Stwierdzono istotne różnice pomiędzy tymi wykresami zarówno w kształcie, jak i położeniu. Wskazano, że istotny wpływ na to ma znaczna różnica pomiędzy obliczoną i wyznaczoną doświadczalnie wartością współczynnika i wykładnika cyklicznego odkształcenia plastycznego. Wielkości te w większości przedstawionych metod powiązane są z przewężeniem próbki i błąd pomiaru tej wielkości istotnie rzutuje na kształt wykresu Morrowa.

1. WPROWADZENIE

Wykresy zmęczeniowe stanowią podstawę obliczeń trwałości zmęczeniowej (Kocańda i Szala, 1997; Szala, 1998). Ze względu na bardzo dużą pracochłonność, czasochłonność i koszty nie zawsze istnieje możliwość przeprowadzenia pełnych badań zmęczeniowych lub też, np. dla celów porównawczych, wystarczy przybliżone wyznaczenie wykresu zmęczeniowego bazujące np. na stosunkowo prostej i szybkiej do wykonania próbie monotonicznego rozciągania. Takie podejście wprowadzane jest między innymi do systemów eksperckich szacujących własności zmęczeniowe (Jeon i Song, 2002).

Jedne z pierwszych propozycji przybliżonego wyznaczenia wykresu zmęczeniowego w ujęciu odkształceniowym opisanego zależnością Morrowa

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N_f)^b + \varepsilon'_f \cdot (2N_f)^c \quad (1)$$

na podstawie próby monotonicznego rozciągania zaproponował Manson (1965). Pierwsza z nich - metoda czterech punktów (*four-point-correlation-method*) została później zmodyfikowana przez Onga (1993b) (*modified four-point-correlation-method*). Metoda druga - uniwersalnego nachylenia (*universal slopes method*) została zmodyfikowana przez Muralidharan'a i Mansona (1988) (*modified universal slopes method*).

Socie i inni (1977) przedstawili zależności do wyznaczenia współczynników we wzorze (1) dla stali. Inną metodę, szczególnie przeznaczoną dla stali o twardości poniżej 500 HB, zaproponował Mitchell (1979). Bäuml i Seeger (1990) przedstawili uniwersalną zależność odpowiednią dla metali (*uniform material law*), której współczynniki są bardzo zbliżone do zmodyfikowanej metody uniwersalnego nachylenia. Roessle i Fatemi (2000) zaproponowali dla stali

metodę bazującą jedynie na twardości i module Younga. Metodę zmiennego nachylenia (*variable slopes method*) doświadczalnie zweryfikowaną dla blach stalowych przedstawili Hatscher i inni (2003). W literaturze polskiej próby znalezienia zależności pomiędzy wybranymi własnościami statycznymi i cyklicznymi znaleźć można w pracy Flasińskiej i Łagody (2005).

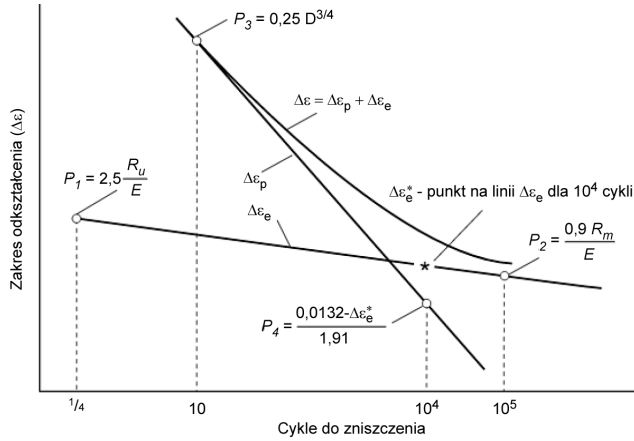
Doświadczalną analizę metod przybliżonego wyznaczenia wykresu zmęczeniowego w ujęciu odkształceniowym zawierają m.in. prace Onga (1993a) (dla 49 stali) oraz Kim'a i innych (2002) (dla 8 stali). Park i Song (1995) przeanalizowali kilka metod dla 138 materiałów (116 stali, 16 stopów aluminium i 6 stopów tytanu) wskazując, że metody zaproponowane przez Bäumela i Seegera (1990), Muralidharana i Mansona (1988) oraz Onga (1993b) lepiej przybliżają dane eksperymentalne niż pozostałe. Song i Park (1996) przeanalizowali 6 metod dla 5 grup materiałów wskazując, że dla stali najlepiej sprawdza się metoda uniwersalnego nachylenia, w przypadku braku wśród własności monotonicznych przewężenia satysfakcjonujące wyniki daje metoda Bäumela i Seegera. Jednocześnie zaproponowali nową metodę lepiej przybliżającą własności zmęczeniowe stopów aluminium stanowiącą modyfikację metody Mitchella (1979). Metodę median (*medians method*) opartą na statystycznej analizie parametrów w zależności (1) przeprowadzonej na podstawie 724 stali i 81 stopów aluminium przedstawili Meggiolaro i Castro (2004).

W niniejszej pracy przedstawiono porównanie wykresu zmęczeniowego w ujęciu odkształceniowym otrzymanego na podstawie badań doświadczalnych zgodnych z normą ASTM E 606-04 z wykresami zmęczeniowymi otrzymanymi na podstawie wyników badań monotonicznych zgodnych z normą ASTM E 8M - 4 i wybranych metod przybliżonego wyznaczania wykresu zmęczeniowego. Porównania tego dokonano dla stopu aluminium 2024-T3.

2. OPIS WYBRANYCH METOD

2.1. Metoda czterech punktów (Manson, 1965)

Metoda czterech punktów (*four-point-correlation-method*) została zaproponowana przez Mansona (1965). Bazuje ona na wartościach odkształcenia plastycznego i sprężystego opisanych liniami $\Delta\epsilon_p$ oraz $\Delta\epsilon_e$ (Rys. 1).



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie zasady wyznaczania wykresu zmęczeniowego w metodzie czterech punktów (Manson, 1965) (na podst. ASM Metals Handbook, 1996)

Linie odkształcenia sprężystego $\Delta\epsilon_e$ w tej metodzie wyznacza się za pomocą dwóch punktów P_1 oraz P_2 opisanych wzorami:

$$P_1 = 2,5 \cdot \frac{R_u}{E}, \quad (2)$$

$$P_2 = 0,9 \cdot \frac{R_m}{E}. \quad (3)$$

Linie odkształcenia plastycznego $\Delta\epsilon_p$ wyznacza się za pomocą dwóch punktów P_3 oraz P_4 opisanych wzorami:

$$P_3 = 0,25 \cdot D^{3/4}, \quad (4)$$

$$P_4 = \frac{0,0132 - \Delta\epsilon_e^*}{1,91}, \quad (5)$$

gdzie D zależy od przewężenia próbki Z :

$$D = \ln\left(\frac{1}{1-Z}\right), \quad (6)$$

natomiast $\Delta\epsilon_e^*$ stanowi zakres odkształcenia sprężystego dla 10 000 cykli obciążenia, który może być opisany zależnością:

$$\Delta\epsilon_e^* = 10^{b \cdot \log(4 \cdot 10^4) + \log\left[\frac{2,5 R_m (1+D)}{E}\right]}. \quad (7)$$

Uwzględniając powyższe wzory współczynnik we wzorze (1) opisać można następującymi zależnościami:

$$\sigma'_f = \frac{E}{2} \cdot 10^{b \cdot \log 2 + \log\left[\frac{2,5 R_m (1+D)}{E}\right]}, \quad (8)$$

$$b = \frac{\log\left[\frac{2,5 \cdot (1+D)}{0,9}\right]}{\log\left(\frac{1}{4 \cdot 10^5}\right)}, \quad (9)$$

$$\epsilon'_f = \frac{1}{2} \cdot 10^{c \cdot \log \frac{1}{20} + \log\left(\frac{1}{4} \cdot D^{3/4}\right)}, \quad (10)$$

$$c = \frac{1}{3} \log\left(\frac{0,0132 - \Delta\epsilon_e^*}{1,91}\right) - \frac{1}{3} \log\left[\frac{1}{4} \cdot D^{3/4}\right]. \quad (11)$$

2.2. Metoda uniwersalnego nachylenia (Manson, 1965)

Metoda uniwersalnego nachylenia (*universal slopes method*) zakłada, że nachylenie linii $\Delta\epsilon_p$ oraz $\Delta\epsilon_e$ opisane wykładnikami b oraz c nie zależy od materiału. Zależności na współczynniki we wzorze (1) przyjmują następującą postać:

$$\sigma'_f = 1,9018 \cdot R_m, \quad (12)$$

$$b = -0,12, \quad (13)$$

$$\epsilon'_f = 0,7579 \cdot D^{0,6}, \quad (14)$$

$$c = -0,6. \quad (15)$$

2.3. Modyfikowana metoda uniwersalnego nachylenia (Muralidharan i Manson, 1988)

Modyfikowana metoda uniwersalnego nachylenia (*modified universal slopes method*) zakłada, podobnie jak oryginalna, że wykładniki b oraz c nie zależą od materiału. Współczynniki we wzorze (1) wyznaczyć można na podstawie zależności:

$$\sigma'_f = E \cdot 0,623 \cdot \left(\frac{R_m}{E}\right)^{0,832}, \quad (16)$$

$$b = -0,09, \quad (17)$$

$$\epsilon'_f = 0,0196 \cdot D^{0,155} \cdot \left(\frac{R_m}{E}\right)^{-0,53}, \quad (18)$$

$$c = -0,56. \quad (19)$$

2.4. Metoda Bäümel'a i Seeger'a (1990)

Metoda ta (*uniform material law*) zakłada stałą wartość wykładnika wytrzymałości zmęczeniowej b i wykładnika cyklicznego odkształcenia plastycznego c oraz współczynnika cyklicznego odkształcenia plastycznego ϵ'_f dla całej grupy materiałów. Zależny od własności materiałowych jest jedynie współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej σ'_f . Współczynniki we wzorze (1) dla tej metody dla stopów aluminium i tytanu określono następująco:

$$\sigma'_f = 1,67 \cdot R_m, \quad (20)$$

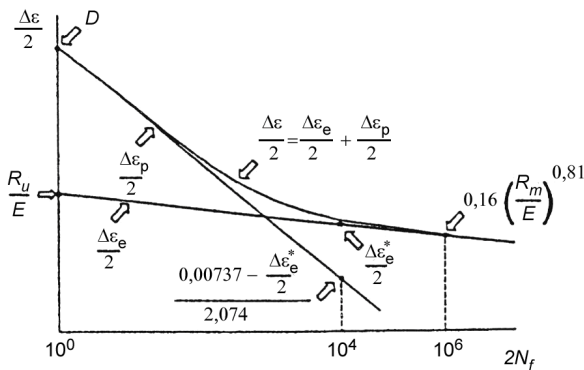
$$b = -0,095, \quad (21)$$

$$\varepsilon'_f = 0,35, \quad (22)$$

$$c = -0,69. \quad (23)$$

2.5. Modyfikacja metody czterech punktów (Ong, 1993)

Modyfikacja metody czterech punktów zaproponowana przez Onga (1993b) nieznacznie różni się od oryginalnej metody zaproponowanej przez Mansona (1965). Wyznaczanie wykresu trwałości zmęczeniowej w ujęciu odkształceniowym wg modyfikacji metody czterech punktów polega na wyznaczeniu amplitudy odkształcenia sprężystego na poziomie 10^0 i 10^6 nawrotów obciążenia oraz plastycznego na poziomie 10^0 i 10^4 nawrotów (Rys. 2).



Rys. 2. Schematyczne przedstawienie zasady wyznaczania wykresu zmęczeniowego w modyfikowanej metodzie czterech punktów (na podst. Ong, 1993b)

Linie odkształcenia sprężystego $\Delta\varepsilon_e/2$ wyznacza się za pomocą dwóch punktów. Pierwszy punkt odpowiada odkształceniu sprężystemu, które przy $2N_f = 10^0$ nawrotów obciążenia prowadzi do zniszczenia

$$P_1 = \frac{R_u}{E}, \quad (24)$$

natomiast drugi punkt prostej amplitudy odkształcenia sprężystego wyznacza się dla $2N_f = 10^6$

$$P_2 = 0,16 \cdot \left(\frac{R_m}{E}\right)^{0,81}. \quad (25)$$

Podobnie jak linie odkształcenia sprężystego również linie odkształcenia plastycznego $\Delta\varepsilon_p/2$ wyznacza się za pomocą dwóch punktów. Pierwszy punkt odpowiada odkształceniu plastycznemu, które przy $2N_f = 10^0$ prowadzi do zniszczenia

$$P_3 = D = \ln\left(\frac{1}{1-Z}\right), \quad (26)$$

natomiast drugi punkt prostej amplitudy odkształcenia plastycznego wyznacza się dla $2N_f = 10^4$

$$P_4 = \frac{0,00737 - \frac{\Delta\varepsilon_e^*}{2}}{2,074}. \quad (27)$$

$\Delta\varepsilon_e^*$ stanowi zakres odkształcenia sprężystego dla $2N_f = 10\ 000$ nawrotów, który może być opisany zależnością:

$$\frac{\Delta\varepsilon_e^*}{2} = \frac{R_u}{E} \cdot 10^{\frac{2}{3} \left[\log\left(0,16 \cdot \left(\frac{R_m}{E}\right)^{0,81}\right) - \log\left(\frac{R_u}{E}\right) \right]}. \quad (28)$$

Współczynniki we wzorze (1) przyjmują w tej metodzie następującą postać:

$$\sigma'_f = R_m \cdot (1 + D), \quad (29)$$

$$b = \frac{1}{6} \cdot \left[\log\left(0,16 \cdot \left(\frac{R_m}{E}\right)^{0,81}\right) - \log\left(\frac{R_u}{E}\right) \right], \quad (30)$$

$$\varepsilon'_f = D, \quad (31)$$

$$c = \frac{1}{4} \cdot \log\left(\frac{0,00737 - \frac{\Delta\varepsilon_e^*}{2}}{2,074}\right) - \frac{1}{4} \cdot \log D. \quad (32)$$

2.6. Modyfikacja metody Mitchella (Song i Park, 1996)

Song i Park zmodyfikowali metodę Mitchella (1979) dostosowując ją specjalnie do stopów aluminium. Metoda ta zakłada, że współczynniki we wzorze (1) wyznaczyć można na podstawie zależności:

$$\sigma'_f = R_m + 335, \quad (33)$$

$$b = -\frac{1}{6} \cdot \log\left(\frac{R_m + 335}{0,446 \cdot R_m}\right), \quad (34)$$

$$\varepsilon'_f = D, \quad (35)$$

$$c = -0,664. \quad (36)$$

2.7. Metoda median (Meggiolaro i Castro, 2004)

Na podstawie własności 81 stopów aluminium współczynniki we wzorze (1) ustalono następująco:

$$\sigma'_f = 1,9 \cdot R_m, \quad (37)$$

$$b = -0,11, \quad (38)$$

$$\varepsilon'_f = 0,28, \quad (39)$$

$$c = -0,66. \quad (40)$$

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

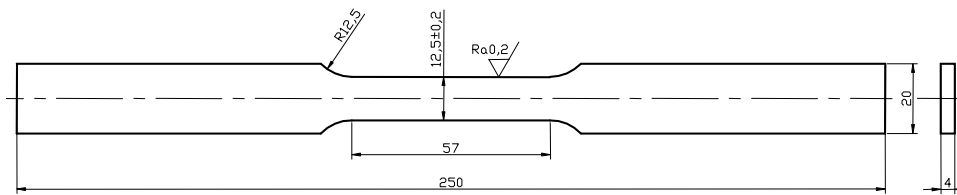
Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w akredytowanym przez Polskie Centrum Akredytacji Laboratorium Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn UTP w Bydgoszczy (Certyfikat Akredytacji Nr AB 372). Zakres akredytacji obejmuje m.in. zastosowane w niniejszej pracy metody badawcze: próbę statycznego rozciągania oraz próbę niskocyklowego zmęczenia metali.

3.1. Próba monotonicznego rozciągania

Podstawowe własności wytrzymałościowe stopu aluminium 2024-T3 w postaci arkusza blachy o grubości 4 mm

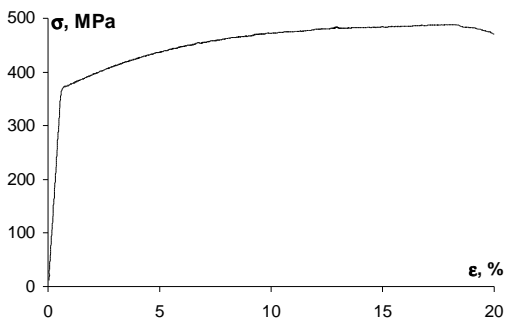
wyznaczono zgodnie z normą ASTM E 8M - 04 *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.

Geometrię próbek zastosowanych w próbach przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Próbkę do próby monotonicznego rozciągania

Przykładowy wykres monotonicznego rozciągania przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Wykres monotonicznego rozciągania próbki ze stopu aluminium 2024-T3

Parametry wytrzymałościowe, na których bazują opisane w punkcie 2 metody przybliżonego wyznaczania wykresu zmęczeniowego, wynoszą:

- moduł Younga: $E = 67\,560$ MPa;
- wytrzymałość doraźna na rozciąganie: $R_m = 488,3$ MPa;
- naprężenie zrywające: $R_u = 616$ MPa;
- przewężenie: $Z = 0,233$.

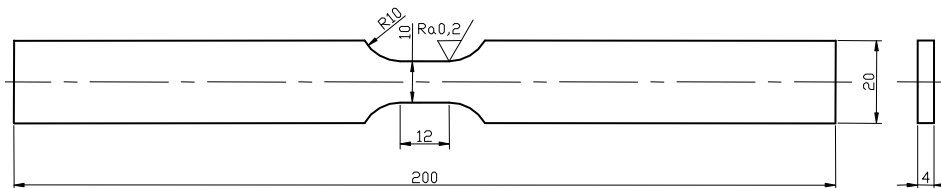
3.2. Badania niskocyklowe

Badania niskocyklowe stopu aluminium 2024-T3 w postaci arkusza blachy o grubości 4 mm przeprowadzono zgodnie z normą ASTM E 606 - 04 *Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing*.

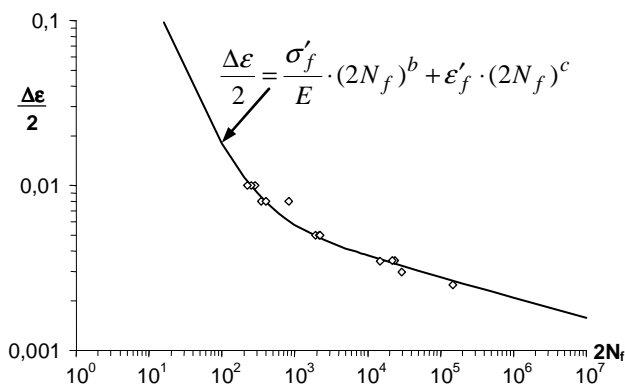
Geometrię próbek zastosowanych w próbach przedstawiono na Rys. 5.

Parametry wykresu zmęczeniowego w ujęciu odkształceniowym (Rys. 6) opisanego zależnością (1) otrzymane na podstawie badań doświadczalnych wynoszą:

- współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej: $\sigma'_f = 777$ MPa;
- wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej: $b = -0,1234$;
- współczynnik cyklicznego odkształcenia plastycznego: $\epsilon'_f = 2,002$;
- wykładnik cyklicznego odkształcenia plastycznego: $c = -1,1203$.



Rys. 5. Próbkę do próby monotonicznego rozciągania



Rys. 6. Wykres zmęczeniowy w ujęciu odkształceniowym dla stopu aluminium 2024-T3 otrzymany na podstawie badań doświadczalnych

4. WYKRESY ZMĘCZENIOWE WYZNACZONE WEDŁUG OPISYWANYCH METOD

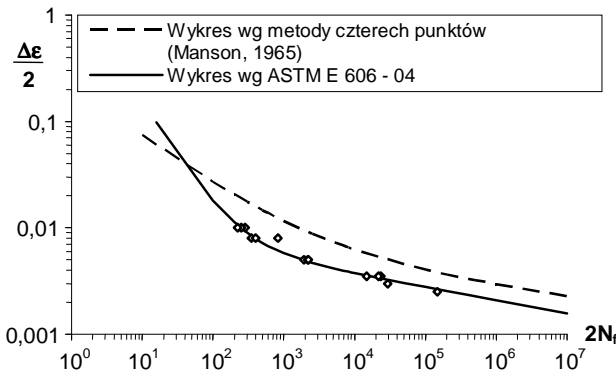
Wykresy zmęczeniowe wyznaczone wg opisywanych w punkcie 2 metod w zestawieniu z wykresem eksperymentalnym zamieszczono na Rys. 7-13. Parametry tych wykresów zestawiono w Tab. 1.

Przedstawione przybliżone wykresy zmęczeniowe we wszystkich przypadkach są przesunięte w stosunku do wykresu otrzymanego doświadczalnie. O ile w zakresie większej liczby cykli, gdzie dominuje sprężysta składowa odkształcenia całkowitego, kształt obu wykresów jest zbliżony, to w przypadku mniejszej liczby cykli, gdzie dominuje odkształcenie plastyczne, wykresy charakteryzują się

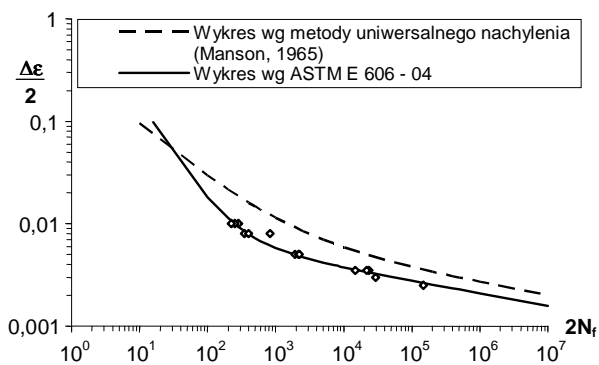
zdecydowanie innym przebiegiem. Powyższe potwierdza analiza wyznaczonych na podstawie opisanych wcześniej metod współczynników wykresu Morrowa.

Tab. 1. Zestawienie współczynników wykresów zmęczeniowych

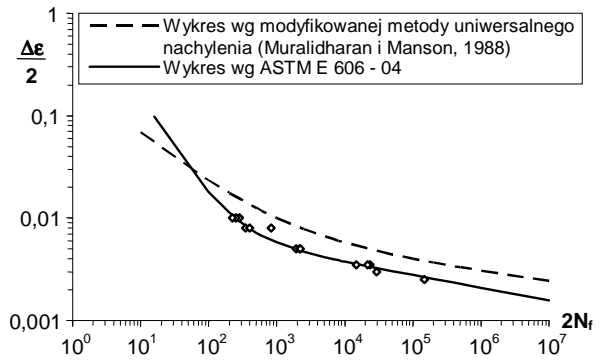
| Parametry wykresu zmęczeniowego | σ'_f , MPa | b | ϵ'_f | c |
|--|-------------------|---------|---------------|---------|
| Metoda czterech punktów | 721,6 | -0,0974 | 0,2153 | -0,5141 |
| Metoda uniwersalnego nachylenia | 928,6 | -0,12 | 0,3416 | -0,6 |
| Modyfikowana metoda uniwersalnego nachylenia | 696,4 | -0,09 | 0,2176 | -0,56 |
| Metoda Bäümel'a i Seeger'a | 815,5 | -0,095 | 0,35 | -0,69 |
| Modyfikacja metody czterech punktów | 617,6 | -0,0817 | 0,2649 | -0,5631 |
| Modyfikacja metody Mitchella | 823,3 | -0,0963 | 0,2649 | -0,664 |
| Metoda median | 927,8 | -0,11 | 0,28 | -0,66 |
| Eksperyment | 777,0 | -0,1234 | 2,002 | -1,1203 |



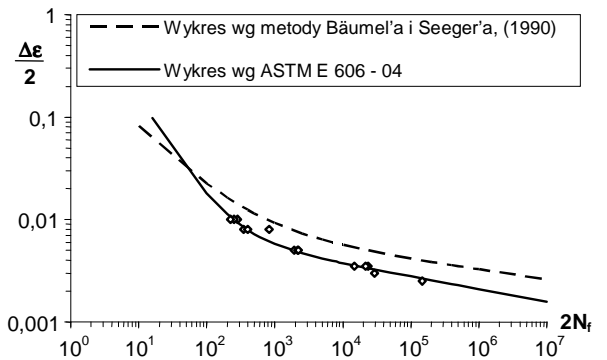
Rys. 7. Wykres zmęczeniowy wg metody czterech punktów



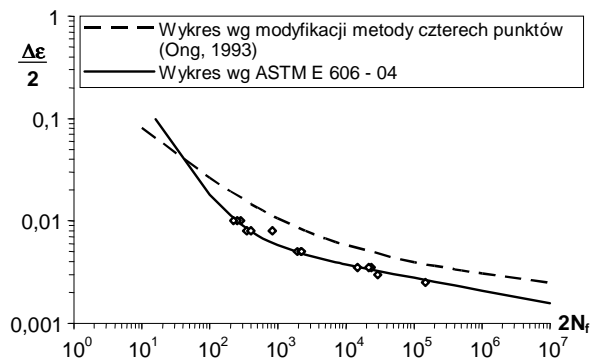
Rys. 8. Wykres zmęczeniowy wg metody uniwersalnego nachylenia



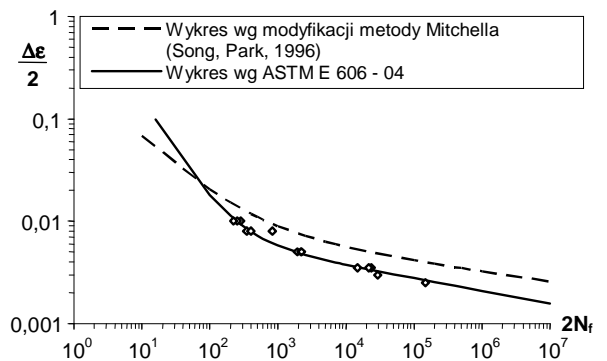
Rys. 9. Wykres zmęczeniowy wg modyfikowanej metody uniwersalnego nachylenia



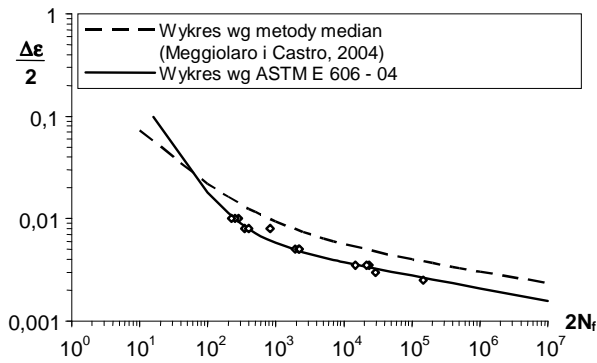
Rys. 10. Wykres zmęczeniowy wg metody Bäümel'a i Seeger'a



Rys. 11. Wykres zmęczeniowy wg modyfikacji metody czterech punktów



Rys. 12. Wykres zmęczeniowy wg modyfikacji metody Mitchella



Rys. 13. Wykres zmęczeniowy wg metody median

Na Rys. 14 przedstawiono wartość współczynnika wytrzymałości zmęczeniowej σ'_f w zależności od metody wyznaczania wykresu zmęczeniowego. Wartości tego współczynnika mieszczą się w zakresie $\pm 20\%$ wartości otrzymanej na podstawie badań eksperymentalnych. Najbardziej zgodne z eksperymentem są wartości otrzymane na podstawie metody Bäumela i Seegera oraz modyfikacji metody Mitchella.

W przypadku wykładnika wytrzymałości zmęczeniowej b wartości obliczone są niższe niż wartość otrzymana doświadczalnie (Rys. 15) i wynoszą od 66% do 97% jej wartości. W tym przypadku najbliższa eksperymentowi jest wartość obliczona na podstawie metody uniwersalnego nachylenia.

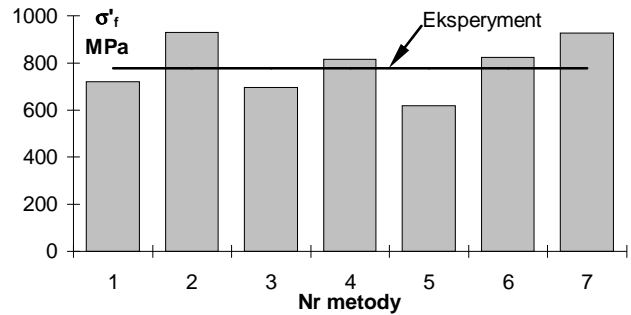
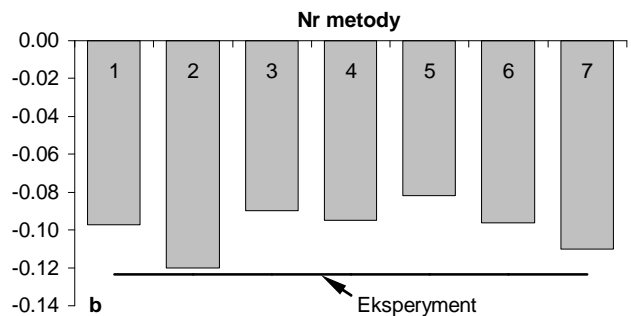
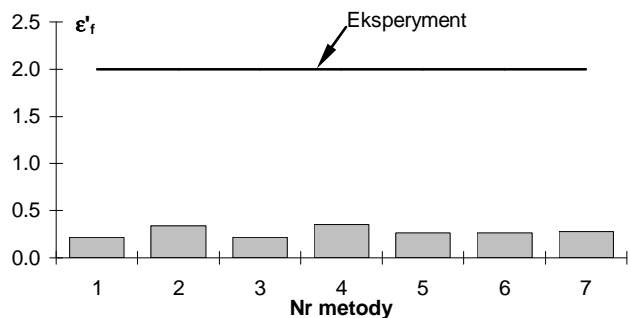
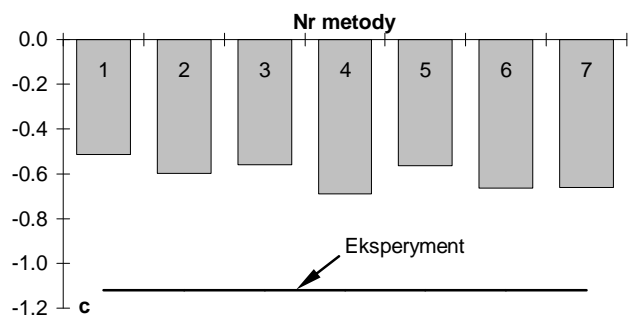
Zarówno w przypadku współczynnika cyklicznego odkształcenia plastycznego ϵ'_f (Rys. 16), jak i wykładnika cyklicznego odkształcenia plastycznego c (Rys. 17) występują znaczne różnice pomiędzy wartościami obliczonymi a wyznaczoną doświadczalnie. W przypadku ϵ'_f różnica ta jest największa, gdyż wartości obliczone są mniejsze od eksperymentalnej od prawie 6 razy (dla metody Bäumela i Seegera) do ponad 9 razy (dla metody czterech punktów i modyfikowanej metody uniwersalnego nachylenia). W przypadku c różnica pomiędzy wartościami obliczonymi a doświadczalną wynosi dużo mniej, bo wartości obliczone są mniejsze od ok. 1,6 razy (dla metody Bäumela i Seegera) do prawie 2,2 razy (dla metody czterech punktów).

Dość dobra zbieżność współczynnika i wykładnika wytrzymałości zmęczeniowej odpowiada za równoległość wykresów w zakresie większej liczby cykli. Zbyt małe wartości współczynnika i wykładnika cyklicznego odkształcenia plastycznego odpowiadają za zbyt małe nachylenie wykresu w zakresie mniejszej liczby cykli.

Zaznaczyć należy, że współczynnik ϵ'_f oraz wykładnik c w większości metod powiązane są z przewężeniem próbki Z i błąd pomiaru tej wielkości istotnie rzutuje na kształt przybliżonej charakterystyki zmęczeniowej.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszej pracy wybrane metody przybliżonego wyznaczania wykresu Morrowa bazujące na wynikach próby monotonicznego rozciągania dla analizowanego materiału w postaci blachy wykonanej ze stopu aluminium 2024-T3 szacują wykres istotnie różniący się od wykresu wyznaczonego doświadczalnie.

Rys. 14. Wartość współczynnika wytrzymałości zmęczeniowej σ'_f w zależności od metody wyznaczania wykresu zmęczeniowegoRys. 15. Wartość wykładnika wytrzymałości zmęczeniowej b w zależności od metody wyznaczania wykresu zmęczeniowegoRys. 16. Wartość współczynnika cyklicznego odkształcenia plastycznego ϵ'_f w zależności od metody wyznaczania wykresu zmęczeniowegoRys. 17. Wartość wykładnika cyklicznego odkształcenia plastycznego c w zależności od metody wyznaczania wykresu zmęczeniowego

Oznaczenia na rysunkach 14-17:

1 – Metoda czterech punktów, 2 – Metoda uniwersalnego nachylenia, 3 – Modyfikowana metoda uniwersalnego nachylenia, 4 – Metoda Bäumel'a i Seeger'a, 5 – Modyfikacja metody czterech punktów, 6 – Modyfikacja metody Mitchella, 7 – Metoda median

Ze względu na położenie wykresów przybliżonych względem wykresu doświadczalnego w każdym z przedstawionych przypadków trwałość zmęczeniowa wyznaczana wg wykresu przybliżonego będzie wyższa niż w przypadku wykresu otrzymanego na podstawie badań niskocyklowych.

Na kształt przybliżonego wykresu zmęczeniowego w analizowanych przypadkach szczególnie istotny wpływ ma znaczna różnica pomiędzy obliczoną i wyznaczoną doświadczalnie wartością współczynnika i wykładnika cyklicznego odkształcenia plastycznego. Wielkości te w większości przedstawionych metod powiązane są z przebiegiem próbki Z i błąd pomiaru tej wielkości istotnie rzutuje na kształt przybliżonej charakterystyki zmęczeniowej.

Spośród przedstawionych w niniejszej pracy metod najbliższe wartości współczynników wykresu Morrowa do otrzymanych na podstawie badań niskocyklowych szacuje metoda Bäumel'a i Seegera.

Dla materiału w postaci blachy wykonanej z wysokowytrzymałego stopu aluminium 2024-T3 istnieje konieczność poszukiwania innych metod przybliżonego wyznaczania wykresu zmęczeniowego w ujęciu odkształceniowym pozwalających na uzyskanie większej zbieżności z wynikami badań niskocyklowych.

LITERATURA

1. **Bäumel A. Jr., Seeger T.** (1990), *Materials data for cyclic loading*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
2. **Flasińska K., Łagoda T.** (2005), Zależności pomiędzy wybranymi właściwościami statycznymi i cyklicznymi stopów aluminium, *Materiały X Konferencji Mechaniki Pęknięcia*, Tom 1, *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej*, Nr 304/2005, z. 82, 279-288.
3. **Hatscher A., Marquardt C., Zenner H.** (2003), Estimation of fatigue material properties for the lifetime prediction of sheet metal structures, *Proceedings of LCF 5 2003*, Berlin, Germany, 409-414.
4. **Jeon W.-S., Song J.-H.** (2002), An expert system for estimation of fatigue properties of metallic materials, *International Journal of Fatigue*, Vol.24, No. 6, 685-698.
5. **Kim K.S., Chen X., Han C., Lee H.W.** (2002), Estimation methods for fatigue properties of steels under axial and torsional loading, *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, 783-793.
6. **Kocańda S., Szala J.** (1997), *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, Warszawa.
7. **Manson S. S.** (1965), Fatigue: A Complex Subject – Some Simple Approximations, *Experimental Mechanics*, Vol. 5,

No. 7, 193-226.

8. **Meggiolaro M.A., Castro J.T.P.** (2004), Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions, *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, No. 5, 463-476.
9. **Mitchell M.R.** (1979), Fundamental of modern fatigue analysis for design, *Fatigue and microstructure*, American Society for Metals, Metals Pack, Ohio, 385-437.
10. **Muralidharan U., Manson S.S.** (1988), Modified universal slopes equation for estimation of fatigue characteristics. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Transactions of the ASME, Vol. 110, No. 1, 55-58.
11. **Ong J. H.** (1993a), An evaluation of existing methods for the prediction of axial fatigue life from tensile data, *International Journal of Fatigue*, Vol. 15, No. 1, 13-19.
12. **Ong J. H.** (1993b), An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data, *International Journal of Fatigue*, Vol. 15, No. 3, 213-219.
13. **Park J., Song J.** (1995), Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties. *International Journal of Fatigue*, Vol. 17, No. 5, 365-373.
14. **Roessle M.L., Fatemi A.** (2000), Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations. *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, No. 6, 495-511.
15. **Socie D.F., Mitchell M.R., Caulfield E.M.** (1977), Fundamentals of modern fatigue analysis, *Fracture Control Program Report*, No. 26, University of Illinois, USA.
16. **Song J.H., Park J.H.** (1996) New Proposal or Estimation of Fatigue Characteristics of Metals, *FATIGUE'96, Proceedings of the Sixth International Fatigue Congress*, Vol. II, Berlin, Germany, 1359-1364.
17. **Szala J.** (1998), *Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych*, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy.

SELECTED METHODS FOR ESTIMATION OF A STRAIN-CONTROLLED FATIGUE LIFE CURVE TO RELY ON THE TENSION TESTING RESULTS FOR INSTANCE OF 2024-T3 ALUMINIUM ALLOY

Abstract: Seven methods for estimation of a strain-controlled fatigue life curve is presented in this paper. These methods rely on the tension testing results. The described methods were put into use to determine of the Morrow's relation for a sheet of 2024-T3 aluminium alloy. The obtained diagrams were compared with an experimental low-fatigue diagram. It was found the significant differences between these diagrams in a shape and in a position. The considerable differences between calculated and experimentally determined values of the cyclic plastic strain coefficient and exponent have a significant influence on these differences. The coefficient and the exponent of the cyclic plastic strain have a connection with the percentage reduction of area in most cases presented in this paper. A measuring error of the percentage reduction of the specimen area significant impinge on a shape of Morrow's diagram.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy nr 61/EUR/2006/02.