

Tomasz TOMASZEWSKI, Janusz SEMPRUCH, Tomasz PIĄTKOWSKI

WYSOKOCYKLOWE BADANIA ZMĘCZENIOWE Z WYKORZYSTANIEM MINIPRÓBEK

Streszczenie

Praca dotyczy oceny trwałości zmęczeniowej, traktowanej jako cecha niezawodności. Specyficznym obszarem zainteresowań Autorów jest sytuacja, kiedy niemożliwe jest pobranie materiału do badań w ilości odpowiadającej próbkom normatywnym. Zaprezentowano metodykę badań z wykorzystaniem próbek o zmniejszonych wymiarach (tzw. minipróbek). W pracy wyznaczono efekt skali dla stopu aluminium EN AW-6063. Uzyskane wyniki pozwoliły określić zależność wytrzymałości na rozciąganie i wytrzymałości zmęczeniowej dla dwóch geometrii próbek. Otrzymano zbieżności wartości współczynnika wrażliwości materiału na zmianę rozmiaru przekroju wyznaczonego z prób monotonicznych i zmęczeniowych.

WSTĘP

Niezawodność obiektów technicznych jest własnością mówiącą nam o tym, czy spełniają one poprawnie powierzone im funkcje, przez określony czas i w określonych warunkach eksploatacji [11]. Jedną z cech niezawodności jest trwałość lub wytrzymałość zmęczeniowa. Efektem finalnym procesu zmęczenia zachodzącego w trakcie eksploatacji elementu konstrukcyjnego jest uszkodzenie, najczęściej w postaci pęknięcia. Złom rozdzielczy z kolei, jest najczęstszą postacią tego pęknięcia. Weryfikacja przydatności do eksploatacji w określonych warunkach (obiekty nowo projektowane) lub dopuszczenia do dalszej eksploatacji (obiekty użytkowane) następuje w formie badań eksperymentalnych, nazywanych badaniami zmęczeniowymi. Ich cechą charakterystyczną są obciążenia modelowane zbieżnie z eksploatacyjnymi. Problemem jest kształtowanie obiektu poddanego badaniom. W niniejszej pracy uwaga Autorów koncentruje się na tych sytuacjach, gdzie istnieje ograniczony dostęp do materiału badawczego. Proponowanym rozwiązaniem jest zastosowaniem próbek o zmniejszonych gabarytach, tzw. minipróbki.

1. CELOWOŚĆ PROWADZENIA BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH NA PRÓBKACH O ZMNIEJSZONYCH GABARYTACH

Praca dotyczy wpływu efektu skali na wytrzymałość zmęczeniową w zakresie próbek mniejszych niż normatywne. Próbki o przekroju roboczym od kilku do kilkunastu milimetrów kwadratowych wykazują różną trwałość zmęczeniową charakteryzującą się wzrostem trwałości dla przekrojów mniejszych. Wielkość zmiany trwałości jest uwarunkowana rodzajem materiału. Materiały o niejednorodnej strukturze lub tak zwane

"nieuporządkowane" wykazują większą wrażliwość na zmianę wymiarów [1]. Przytoczone informacje odnoszą się głównie do stali, dla których wyniki badań eksperymentalnych opisano w pracy [9].

Przyjmuje się, że efekt skali charakteryzuje współczynnik [4]:

$$K_d = \frac{Z_d}{Z} \quad (1)$$

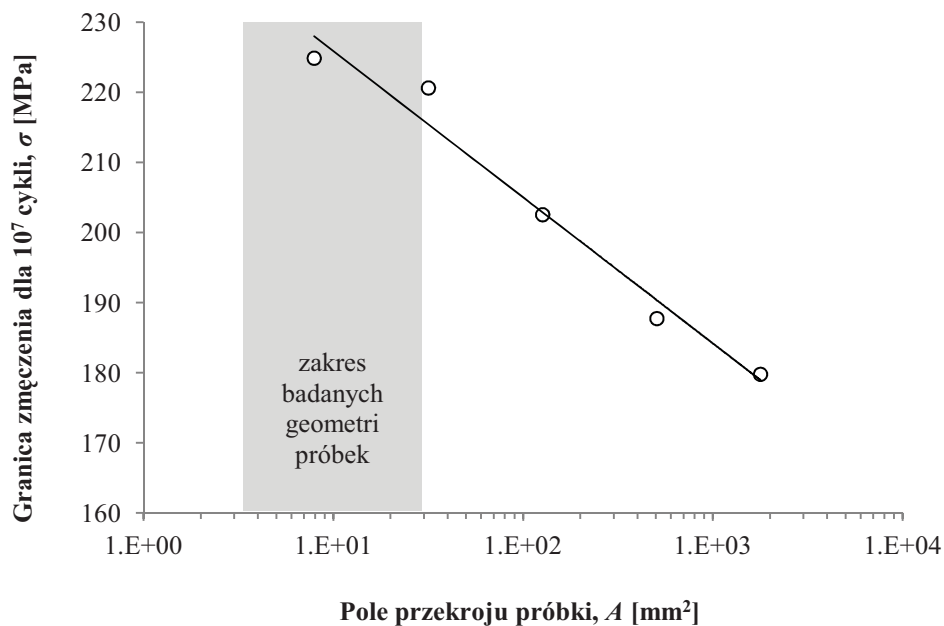
gdzie:

- Z_d – wytrzymałość zmęczeniowa próbki o dowolnym przekroju,
- Z – wytrzymałość zmęczeniowa próbki z tego samego materiału, o przekroju $20 \div 80 \text{ mm}^2$.

Teoretyczne modele obliczeniowe dotyczące wrażliwości materiału na zmiany rozmiaru przekroju definiują wielkość współczynnika K_d dla stopu aluminium na poziome 1 [6]. Wyniki badań eksperymentalnych są w wielu przypadkach odmienne od powyższych założeń.

Jako przykład, na rys. 1 przedstawiono zależność granicy zmęczenia dla 10^7 cykli do przekroju próbki ($3,2 \text{ mm} \div 48 \text{ mm}$). Przytoczone wyniki badań eksperymentalnych wykonano dla stopu aluminium 75S-T6. Badane próbki były zginane obrotowo. Próbki były okrągłe, w kształcie klepsydry [3]. Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano efekt skali, gdzie wraz ze wzrostem przekroju spada znacząco wytrzymałość zmęczeniowa. Wg autorów [4], w wyniku większej objętości próbki występuje większe prawdopodobieństwo wystąpienia wrażeń inicjujących pęknięcie.

Zaobserwowano niejednoznaczność modeli obliczeniowych i wyników badań. Dlatego, zweryfikowano eksperymentalnie efekt skali dla próbek mniejszych (minipróbek) od normatywnych. Celowość badań w tym zakresie wymiarowym jest uzasadniona z uwagi na liczne korzyści prowadzenia badań na minipróbkach. Jedną z nich jest przypadek, kiedy wykonanie próbki normatywnej jest ograniczone gabarytami badanych obiektów. Jednym z rozwiązań jest stosowanie minipróbek [10]. Zakres zainteresowań badanych wymiarów próbek oznaczono symbolicznie na rys. 1.



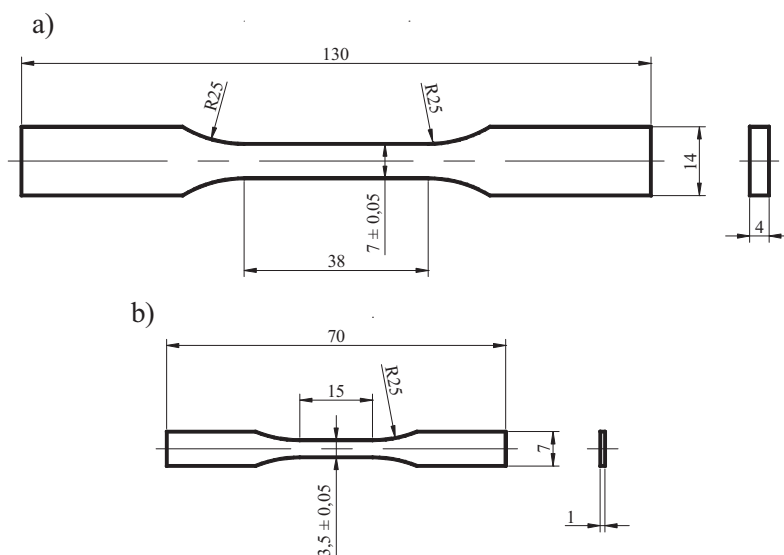
Rys. 1. Zależność granicy zmęczenia dla 10^7 cykli do pola przekroju próbki wykonanej ze stopu aluminium 75S-T6 [3]

2. METODYKA BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH REALIZOWANYCH NA MINIPRÓBKACH

Na metodykę badań składa się określenie:

- materiału próbki,
- własności wytrzymałościowe materiału,
- geometrii minipróbki i próbki normatywnej do badań zmęczeniowych,
- zakresu stosowanych naprężeń w obszarze wytrzymałości wysokocyklowej,
- pozostałych warunków badań zmęczeniowych (częstotliwość, współczynnik asymetrii cykli, stanowisko badawcze).

W celu wyznaczenia własności wytrzymałościowych badanego stopu aluminium EN AW-6063 przeprowadzono statyczną próbę rozciągania zgodnie z [8]. Uznając, że własności wytrzymałościowe (granica plastyczności R_e , wytrzymałość na rozciąganie R_m) stopów aluminium zależne są od pola przekroju zrealizowano badania monotoniczne dla próbek normatywnych (przekrój roboczy - 28 mm²) (rys. 2a) i minipróbek (przekrój roboczy 3,5 mm²) (rys 2b). Relacja przekroju próbki normatywnej i mniejszej wynosi 8. Zgodnie z wieloma publikowanymi wynikami badań, można przyjąć, że próbka mniejsza kwalifikuje się do grupy próbek o małym przekroju. Uzyskane wyniki przedstawiono w tab. 1, a krzywą odkształcenie-naprężenie na rys. 3.

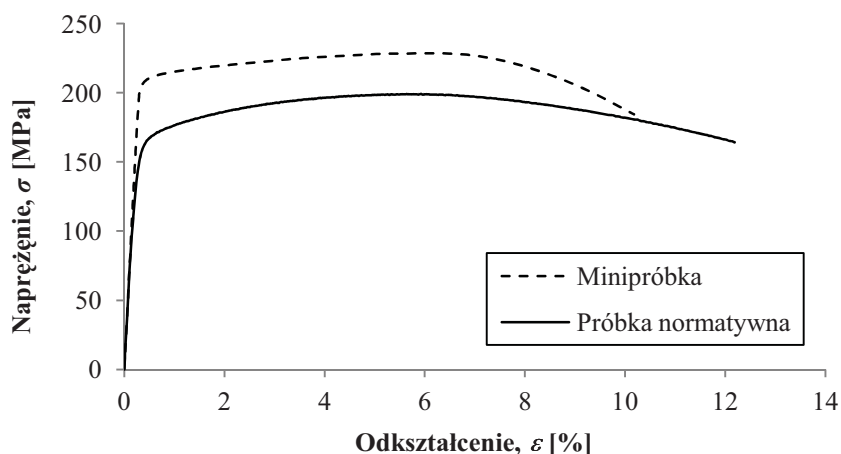


Rys. 2. Geometria próbki do badań statycznych: a) normatywna [8]; b) miniprobka

Tab. 1. Wyniki z próby statycznego rozciągania

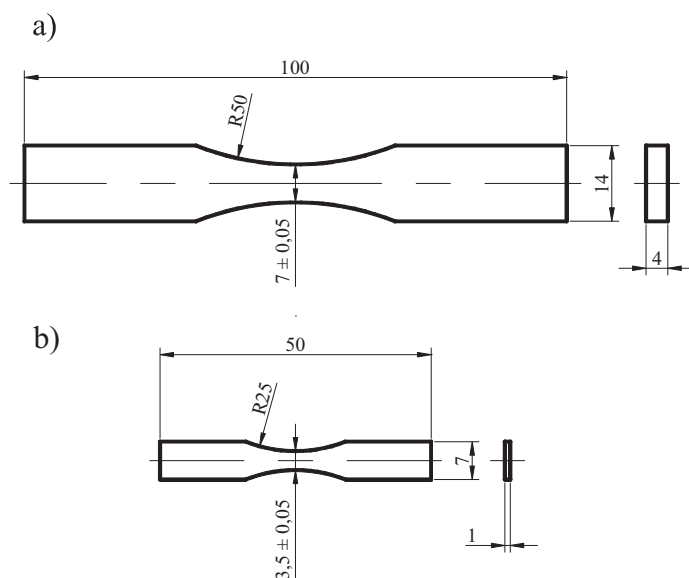
Próbka normatywna				Miniprobka			
R_m , MPa	R_e , MPa	A , %	Z , %	R_m , MPa	R_e , MPa	A , %	Z , %
200	167	16,6	61,2	230	208	10,8	53,0

Uzyskane wyniki z prób monotonicznych charakteryzowały się innymi wartościami własności wytrzymałościowych. Dla próbek normatywnych wytrzymałość na rozciąganie była większa o 15 %, a granica plastyczności o 25 % w stosunku do minipróbek. Odwrotnie zachowują się parametr A (spadek o 35 %) i Z (spadek o 13,4 %).



Rys. 3. Krzywa odkształcenie-napężenie dla próbki normatywnej i minipróbki

Badania zmęczeniowe w zakresie wytrzymałości wysokocyklowej zrealizowano w oparciu o próbkę normatywną i minipróbkę (rys. 4). Wyeliminowano wpływ kształtu próbki na wyniki badań eksperymentalnych stosując jednakowy współczynnik kształtu (α_k) równy 1,05.



Rys. 4. Geometria próbki do badań zmęczeniowych: a) normatywna [7]; b) minipróbka

Zakres stosowanych obciążeń w badaniach zmęczeniowych dla stopu aluminium był znacznie powyżej granicy plastyczności (R_e). Badany materiał charakteryzował się brakiem stabilizacji własności cyklicznych. Przeprowadzono badania własności wytrzymałościowych wstępnie cyklicznie odkształconych próbek. Odnotowano wzrost granicy plastyczności o 15 %. Zaobserwowane zmiany własności materiału tłumaczone są cyklicznym umocnieniem próbek wstępnie odkształconych cyklicznie. Wyniki umożliwiły odrzucenie granicy plastyczności jako górnego kryterium wytrzymałości wysokocyklowej. Szczegółowy sprawozdanie z badań i uzyskanych wyników opisano w pracy [10].

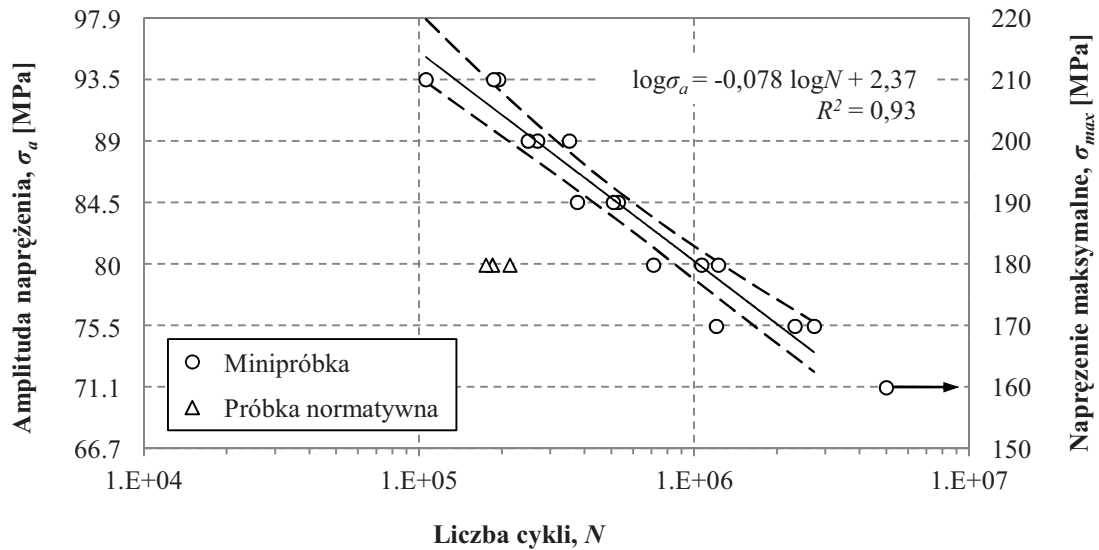
Badania zmęczeniowe przeprowadzono w zakresie wytrzymałości wysokocyklowej. W celu uniknięcia wyboczenia się próbek zastosowano cykl zmiany obciążenia o współczynniku asymetrii cyklu $R = 0,1$. Badania realizowano z częstotliwością zmiany obciążenia 5 Hz.

Badania zmęczeniowe, jak i monotoniczne przeprowadzono na serwohydraulicznej maszynie wytrzymałościowej Instron 8874. Do badań monotonicznych zastosowano ekstensometr o długości pomiarowej 25 mm.

3. UZYSKANE REZULTATY

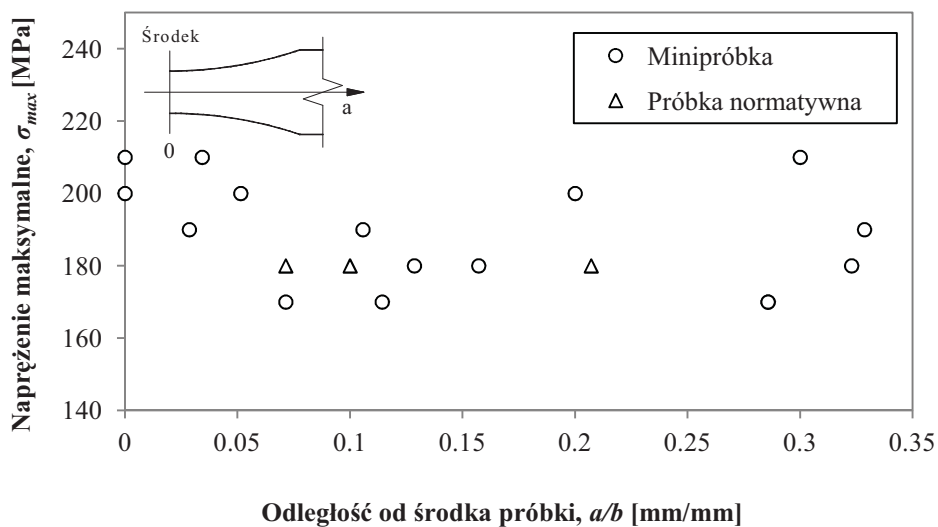
3.1. Wyniki badań własnych

Własne badania zmęczeniowe zrealizowano na podstawie opisanej metodyki badań. Jako kryterium końca próby zmęczeniowej przyjęto makropęknięcie. Dla uzyskanych wyników (krzywa σ_a-N , rys. 5) z wykorzystaniem minipróbki wykreślono prostą regresji (współczynnik kierunkowy $m = 12,4$) o współczynniku determinacji na poziomie 0,93.



Rys. 5. Krzywa σ_a-N dla stopu aluminium EN AW-6063

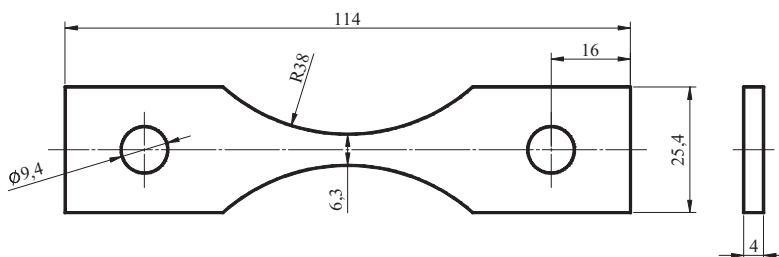
Na rys. 6 przedstawiono położenie makro pęknięcia względem środka geometrycznego próbki (stosunek odległości przełomu od środka próbki (a) do szerokości próbki (b)). Charakteryzuje się ono rozkładem losowym. Nie zaobserwowano wpływu kształtu geometrii i innych czynników na wynik badań. Jako wiarygodne wyniki potraktowano tylko te, gdzie próbka uległa zniszczeniu w odległości nie większej niż 1,5 mm od środka próbki.



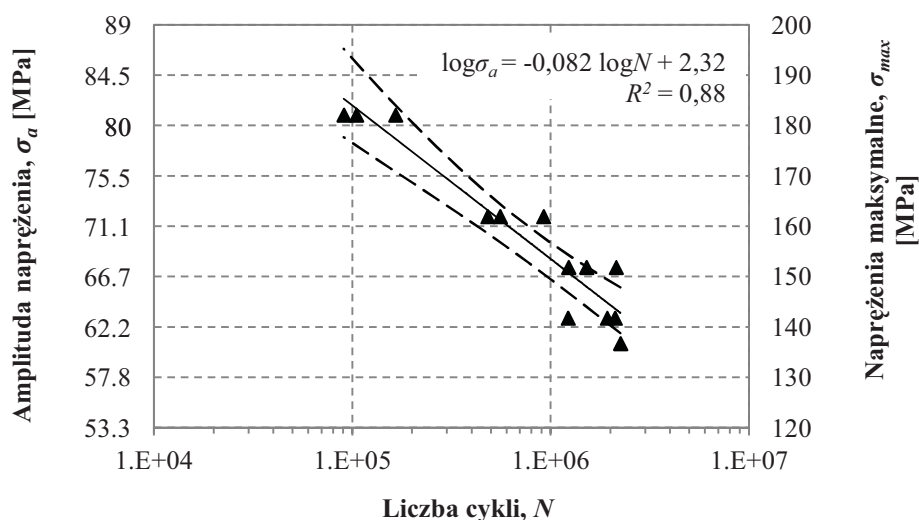
Rys. 6. Położenie pęknięcia próbki dla naprężeń maksymalnych

3.2. Wyniki badań zaczerpnięte z literatury

Wyniki badań eksperymentalnych stopu aluminium EN AW-6063 w stanie T7 w zakresie zmęczenia wysokocyklowego zostały szczegółowo opisane w pracy [5]. Badania dotyczyły określenia wpływu właściwości materiałowych (skład chemiczny, mikrostruktura, obróbka cieplna) na właściwości zmęczeniowe materiału. Wykorzystany materiał charakteryzował się wytrzymałością na rozciąganie na poziomie 213 MPa i granicą plastyczności 186 MPa. Na rys. 8 przedstawiono krzywą σ_a-N dla wyników uzyskanych z wykorzystaniem próbki normatywnej (rys. 7) zgodnej z normą ASTM E466-96. Próbkę badano z częstotliwością w zakresie od 30 do 70 Hz. Zastosowano cykl sinusoidalny o współczynniku asymetrii cykli $R = 0,1$. Stosowane parametry badań i przytoczone wyniki są porównywalne z badaniami własnymi (3 próbki na poziomie amplitudy naprężenia 80 MPa), dlatego zostały wykorzystane na potrzeby analizy wyników.



Rys. 7. Geometria próbki do badań zmęczeniowych wykorzystana w pracy [5]



Rys. 8. Krzywa σ_a-N dla stopu aluminium EN AW-6063 [5]

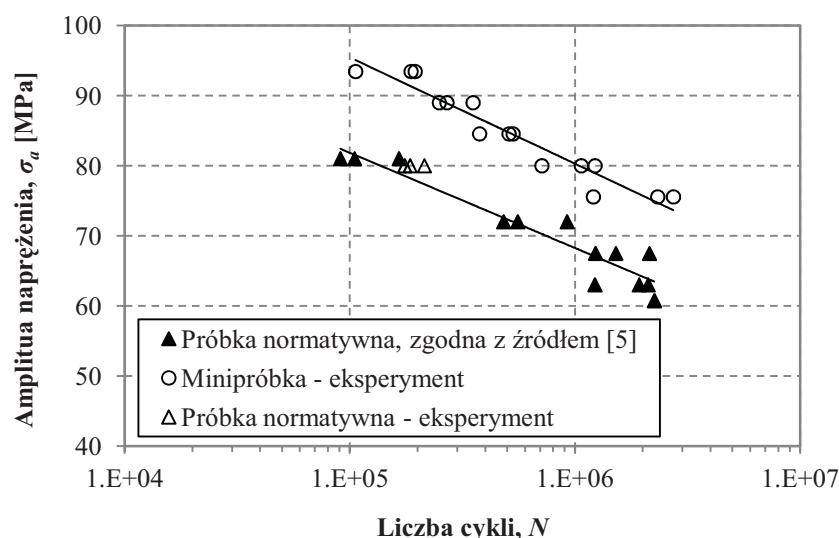
4. ANALIZA STATYSTYCZNA - TEST ISTOTNOŚCI RÓŻNIC

Analiza statystyczna wyników badań dotyczyła przeprowadzenia testu równoległości dla współczynnika kierunkowego (a) funkcji regresji ($y = ax + b$) [2]. Celem było sprawdzenie hipotezy zerowej (H_0) dotyczącej istotności otrzymanych z prób współczynników regresji liniowej. Hipoteza alternatywna (H_1) zakładała różne wartości współczynnika kierunkowego prostej. Hipotezy sformułowano w postaci: $H_0: a_1 = a_2$, $H_1: a_1 \neq a_2$.

Uzyskano proste regresji wyników badań zmęczeniowych (Rys. 9) dla:

- próbki normatywnej (wg. źródła [5]): $\log \sigma_a = -0,082 \log N + 2,32$,
- minipróbki: $\log \sigma_a = -0,078 \log N + 2,37$.

Zweryfikowano hipotezę wykorzystując test istotności dla dwóch współczynników regresji. Weryfikację hipotezy przeprowadzono dla wyników uzyskanych z wykorzystaniem minipróbki (badania własne) i próbki normatywnej (źródło literaturowe [5]).



Rys. 9. Zestawienie wyników badań eksperymentalnych dla stopu aluminium EN AW-6063

Wartość statystyki testowej t wyznaczono dla stopni swobody $n_1 = 13$ (próbka normatywna), $n_2 = 15$ (minipróbka). Wartość krytyczną t_{tab} odczytano z rozkładu t Studenta dla $n_1 + n_2 - 4$ stopni swobody dwustronnego obszaru krytycznego. Test równoległości przeprowadzono na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Otrzymano nierówność $|t| < t_{tab}$. Nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej H_0 o równości współczynników kierunkowych prostych regresji dla krzywych σ_a-N próbki normatywnej i minipróbki. Zmiennym parametrem jest wyraz wolny (b) równania prostej. Dlatego, wpływ efektu skali można opisać współczynnikiem rozmiaru przekroju K_d , który dla uzyskanych wyników badań zmęczeniowych był równy 1,17.

PODSUMOWANIE

Badano wpływ efektu skali dla stopu aluminium EN AW-6063 w zakresie zmęczenia wysokocyklowego. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych (monotonicznych, zmęczeniowych) uwidocznily wrażliwość materiału na zmiany rozmiaru przekroju w zakresie próbek mniejszych (minipróbek) od normatywnych. Wytrzymałość zmęczeniowa i wytrzymałość na rozciąganie minipróbek była większa niż próbek normatywnych. Dzięki przeprowadzonej analizie statystycznej możliwa była weryfikacja hipotezy o równoległości krzywych σ_a-N badanych geometrii próbek. Wyznaczono współczynnik rozmiaru przekroju K_d dla wartości uzyskanych z prób monotonicznych (dla wytrzymałości na rozciąganie – 1,15) i badań zmęczeniowych (dla wytrzymałości zmęczeniowej – 1,17). Na podstawie uzyskanych zbieżności wyników badań możliwe jest odniesienie współczynnika K_d z prób monotonicznych bezpośrednio do badań zmęczeniowych. Twierdzenie to wymaga dalszej weryfikacji.

Określenie współczynnika efektu skali dla materiału jest niezbędnym etapem w przypadku odniesienia wykresu zmęczeniowego σ_a-N do obiektu rzeczywistego. Brak uwzględnienia wpływu rozmiaru przekroju może być przyczyną wystąpienia przelomu zmęczeniowego znacznie poniżej charakterystyki wyznaczonej dla próbki normatywnej, minipróbki.

BIBLIOGRAFIA

1. Carpinteri A., Spagnoli A., Vantadori S., *Size effect in S-N curves: A fractal approach to finite-life fatigue strength*, International Journal of Fatigue 31, 2009.
2. Greń J., *Statystyka matematyczna. Modele i zadania*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Poland, 1978.
3. Hyler W. S., Lewis R. A., Grover H. J., *Experimental investigation of notch-size effects on rotating-beam fatigue behaviour of 75S-T6 aluminum alloy*, National advisory committee for aeronautics, 1954.
4. Kocańda S., Szala J., *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Poland, 1997.
5. Luo A. A., Kubic R. C., Tartaglia J. M., *Microstructure and fatigue properties of hydroformed aluminum alloys 6063 and 5754*, Metallurgical and Materials Transactions A 34A, 2003.
6. Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J., *Ocena wytrzymałości, trwałości i bezpieczeństwa pracy elementów konstrukcyjnych zawierających defekty*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Poland, 2008.
7. PN-74/H-04327. Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania – ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych.
8. PN-EN ISO 6892-1:2010. Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
9. Sempruch J., Tomaszewski T., *Application of mini specimens to high-cycle fatigue tests*, Journal of POLISH CIMAC, Vol. 6 No. 3, 2011.
10. Tomaszewski T., Sempruch J., *Determination of the fatigue properties of aluminum alloy using mini specimen*, Materials Science Forum, Volume 726, 2012.
11. Warszzyński M., *Niezawodność w obliczeniach konstrukcyjnych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Poland, 1988.

HIGH CYCLE FATIGUE TESTS USING MINI SPECIMEN

Abstract

The paper concerns the assessment of the fatigue life, which is treated as a feature of reliability. A specific area of interest for the Authors is situation, where taking test material is impossible in a quantity corresponding a normative specimens. The methodology of the tests using specimens with reduced dimensions (called mini specimen) were presented. The paper attempts to determine the size effect for the EN AW-6063 aluminum alloy. The results have made it possible to define the relationship of the ultimate tensile strength and fatigue strength for two geometry of the specimens. The values of the coefficient of material sensitivity to change in the cross-section for monotonic and fatigue tests are similar.

Autorzy:

mgr inż. **Tomasz Tomaszewski** – Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,

prof. dr hab. inż. **Janusz Sempruch** – Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,

dr hab. inż. **Tomasz Piątkowski**, prof. nadzw. UTP – Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej.