

Tomasz TOMASZEWSKI, Janusz SEMPRUCH

**WYKORZYSTANIE MINIPRÓBEK DO WYZNACZANIA
TRWAŁOŚCI I WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ
MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH**

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodykę prowadzenia badań do wyznaczenia własności zmęczeniowych materiału z wykorzystaniem minipróbek. Sformułowano hipotezy badawcze i metodykę badań. Wyniki analizowano w zakresie wpływu efektu skali.

Słowa kluczowe: zmęczenie wysokocyklowe, minipróbka, krzywa σ_a-N

1. WPROWADZENIE

Eksploatowane elementy konstrukcyjne narażone są na zmęczeniowe pękanie powodowane obciążeniami zmiennymi w czasie. Proces jest na tyle złożony, a na jego przebieg wpływa tak wiele czynników, że nie występuje jeden model opisujący zachowanie się materiału poddanego obciążeniom cyklicznym. Proces zmęczenia opisywany jest najczęściej jako fenomenologiczny, w którym brak bezpośredniego odwołania do rzeczywistej struktury materiału i fizycznego opisu zachodzących w nim zmian [6].

Stosowanie nowych technologii produkcji elementów konstrukcyjnych generuje zapotrzebowanie na identyfikację ich własności zmęczeniowych. Z wielu przyczyn (m.in. narzucona geometria próbek) normatywne zalecenia prowadzenia badań ograniczają ich realizację. W pracy przedstawiono metodykę badań wykorzystującą próbkę niestandardową (próbka geometrycznie mniejszą od próbki normatywnej, tzw. minipróbka). Celowość jej wykorzystania wynika z zalet wynikających z jej geometrii.

Wykorzystanie minipróbek rozszerza zakres wyznaczenia własności cyklicznych materiału elementu konstrukcyjnego, którego wymiary ograniczają pobranie próbek do badań [8] (np. profile kształtowe produkowane ze stopu aluminium w procesie wyciskania materiału przez matrycę). W przypadku identyfikacji stopnia uszkodzenia obiektów eksploatowanych, niewielka objętość sprzyja pobraniu wymaganej liczbie próbek do realizacji pełnej próby zmęczeniowej. Minipróbki mogą być badane na niestandardowych maszynach wy-

mgr inż. Tomasz TOMASZEWSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: tomaszewski@utp.edu.pl

prof. dr hab. inż. Janusz SEMPRUCH, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: semjan@utp.edu.pl

trzymałościowych o niewielkim zakresie stosowanych obciążeń. Prowadzi to do wykorzystania uproszczonych układów obciążających zmęczeniowo próbkę, jednocześnie obniżając wysokie koszty realizacji badań.

Ponadto, zastosowanie minipróbek wiąże się z ograniczeniami w zakresie ich kształtowania (typ obróbki, kształt geometrii), obciążeń (brak możliwości stosowania sił ściskających), implementacji wyników (uwzględnienie wrażliwości materiału na zmianę wielkości przekroju, asymetrię cyklu).

1.1. Hipotezy pracy

Zakładając, że w procesie weryfikacji nowych rozwiązań konstrukcyjnych, jak i rozwiązań już istniejących możliwym jest wystąpienie sytuacji braku dostępności materiału na wykonanie próbek normatywnych, celem jest wówczas sformułowanie poniższych hipotez badawczych:

1. Możliwa jest weryfikacja własności zmęczeniowych materiału na podstawie metodyki badań geometrię próbek o mniejszych wymiarach od normatywnych. Przez metodykę badań rozumie się zdefiniowanie sposobu kształtowania i wykonywania próbki, zakresu możliwych do zastosowania obciążeń. Materiał próbki traktowany będzie jako zmienna niezależna programu badawczego.
2. Badania porównawcze wysokocyklowej trwałości zmęczeniowej, pomiędzy próbką normatywną a minipróbką, przeprowadzone dla wybranych grup materiałów mogą być podstawą określenia zakresów zastosowania dostępnych matematycznych modeli efektu skali.

W zakresie prowadzonych badań sformulowano hipotezę, której nie weryfikowano w pracy:

1. Istnieje grupa materiałów konstrukcyjnych, dla których wskazane wyżej relacje mają postać uproszczoną (niski poziom wrażliwości na efekt skali), a realizacja badań na minipróbkach wykonanych z tych materiałów jest szczególnie celowa z punktu widzenia kosztów badań, w tym sensie także dostępności badań. Celem wówczas staje się rozszerzenie idei miniprobki również w przypadku dostępności materiału na próbki normatywne.

1.2. Cele pracy

Sprawdzenie przedstawionych hipotez badawczych możliwe będzie poprzez realizację celu głównego pracy:

- opracowanie oraz weryfikacja metodyki badań zmęczeniowych z wykorzystaniem miniprobki dla wybranych materiałów konstrukcyjnych.

Celami pozostałymi są:

- określenie wpływu efektu skali na wytrzymałość zmęczeniową i wytrzymałość na rozciąganie materiału dla danej grupy metali,
- projekt konstrukcji i wykonanie stanowiska do badań zmęczeniowych miniprobki w warunkach zmiennych obciążeń jednoosiowych,
- implementacja wybranych modeli obliczeniowych teorii efektu skali.

2. EFEKT SKALI W BADANIACH ZMĘCZENIOWYCH

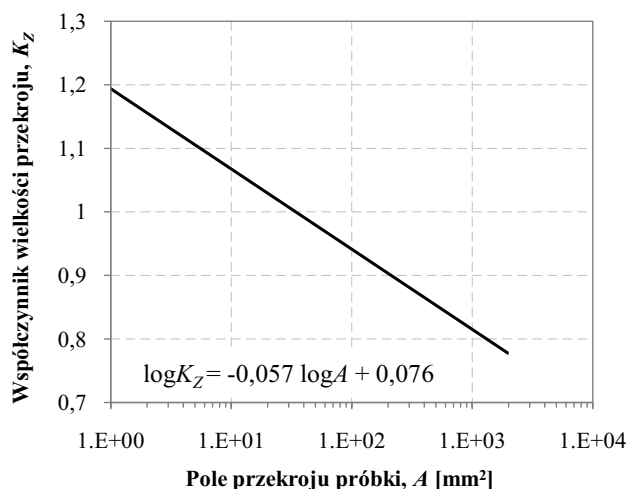
W przypadku metali wpływ na zmiany własności wytrzymałościowych (monotonicznych, cyklicznych) ma wielkość przekroju obiektu. Wielkość tej zmiany uzależniona jest od rodzaju i lokalnych cech (wielkości ziarna, mikro-pęknięć, wtrąceń, nieciągłości, dyslokacji, innych wad) badanego materiału. Przedstawione zjawisko nazywane jest efektem skali. Opisywane jest z wykorzystaniem modeli probabilistycznych. W większej objętości materiału wzrasta prawdopodobieństwo wystąpienia ognisk inicjujących zmęczeniowe pękanie [7]. Efekt można opisać za pomocą zależności:

$$K_Z = \frac{Z}{Z_n}, \quad K_{HC} = \frac{\sigma}{\sigma_n}, \quad K_S = \frac{R_m}{R_{mn}} \quad (1a, b, c)$$

gdzie:

- $Z/\sigma/R_m$ – granica zmęczenia/wytrzymałość zmęczeniową/wytrzymałość na rozciąganie próbki o dowolnym przekroju,
- $Z_n/\sigma_n/R_{mn}$ – granica zmęczenia/wytrzymałość zmęczeniową/wytrzymałość na rozciąganie próbki normatywnej (przekrój 20-80 mm²), przy zachowaniu tego samego materiału.

Efekt skali został udowodniony eksperymentalnie. Przykładem jest prosta opisująca zależność współczynnika wielkości przekroju K_Z od pola przekroju próbki A wyznaczona dla stopów aluminium (rys. 1.)



Rys. 1. Zależność współczynnika wielkości przekroju od pola przekroju dla stopów aluminium na podstawie [14]

Fig. 1. Relation between the coefficient of the cross-sectional size to cross-sectional area for aluminum alloys based on [14]

Uwzględnienie efektu skali ma wyjątkowe znaczenie w przypadku obiektów o dużych gabarytach. Większość badań wytrzymałościowych realizowana jest w warunkach laboratoryjnych na próbkach wykonanych zgodnie z normą.

Istnieje potrzeba ekstrapolacji dostępnych wyników do obiektów o innych wielkościach (obiekty rzeczywiste, próbki niestandardowe). W tym celu zostały zaproponowane matematyczne modele efektu skali.

3. MODELE EFEKTU SKALI

3.1. Teoria najslabszego ogniwa

Teoria najslabszego ogniwa została zaproponowana przez Weibulla. Bazuje na rozkładzie prawdopodobieństwa zniszczenia obiektu. Jest stosowana do opisu rozrzutu wyników własności metali w zakresie obciążeń cyklicznych [16]. Jednym z głównych założeń teorii jest statystyczne rozmieszczenie defektów w danej jednostce objętości materiału. Rozkład prawdopodobieństwa zniszczenia w postaci dwu parametrycznej przyjmuje postać:

$$P(N) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\log N}{\log N_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

gdzie:

N_0 – referencyjna trwałość zmęczeniowa dla danego poziomu naprężenia,
 m – parametr kształtu rozkładu.

Dla próbek geometrycznie podobnych o jednakowych rozkładach naprężeń, równych wartościach prawdopodobieństwa zniszczenia i różnych polach przekroju można wyprowadzić zależność:

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

gdzie:

N_1 – trwałość zmęczeniowa dla próbki o znanym polu przekroju A_1 ,
 N_2 – trwałość zmęczeniowa dla próbki o szukanym polu przekroju A_2 .

3.2. Podejście fraktalne

Wrażliwość materiału na zmianę wielkości przekroju opisywana jest modelem fraktalnym w zakresie wytrzymałości na rozciąganie [2] i wytrzymałości zmęczeniowej [3]. Struktura materiału modelowana jest za pomocą fraktali. Nowe właściwości wytrzymałościowe materiału wyznaczone są z fizycznych wymiarów zależnych od wymiaru fraktalnego (wymiar niecałkowity).

Liniowe skalowanie fraktali opisano podejściem monofraktalnym, w którym wymiar fraktalny traktowany jest jako wartość stała. Jest ono poprawne w wąskim zakresie rozmiarów obiektu. Podejście jest stosowane do opisu efektu skali w zakresie zmęczenia wysokocyklowego. Bazuje na równaniu Basquina wyrażonego równaniem:

$$C = N(\sigma_a)^\beta \quad (4)$$

gdzie:

β – współczynnik kierunkowy nachylenia krzywej σ_a-N ,
 C – parametr stały.

Zakładając równoległe położenie wykresów σ_a-N dla próbek o różnym przekroju i zależności parametru stałej C od pola przekroju A , możliwa jest do wyprowadzenia zależność [3]:

$$C_B = C_A \left(\frac{A_A}{A_B} \right)^{-d \cdot \beta} \quad (5)$$

gdzie:

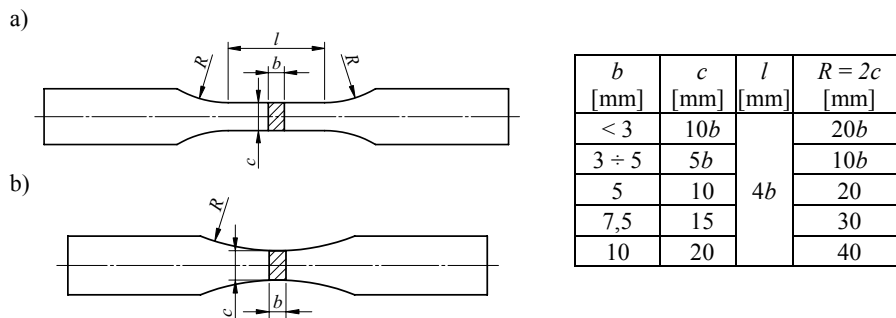
A_A, A_B – pola przekroju dla próbek geometrycznie podobnych przy założeniu $A_B > A_A$,
 C_A, C_B – parametry stałe krzywej σ_a-N ,
 $d \cdot \beta$ – iloczyn parametru d i współczynnika kierunkowego nachylenia krzywej σ_a-N .

4. USTALENIE GEOMETRII PRÓBKII

Realizacja próby zmęczeniowej powinna być wykonywana zgodnie z aktualnie obowiązującą normą, w której określono geometrię próbki, sposób jej pobierania i wykonywania, warunki obciążenia, zakres stosowanych częstotliwości, sprawozdanie wyników. W proponowanej metodyce zakres ingerencji w zmianę normatywnych warunków badań dotyczy wyłącznie geometrii próbek. Pozostałe warunki badań są zgodne z normami.

4.1. Normalizacja próbek

Wymiary gabarytowe i kształt próbek do badań zmęczeniowych jest zależny od warunków badań. Na rysunku 2 zamieszczono przykładową geometrię próbki płaskiej o stałym i zmiennym przekroju (według normy PN-74/H-04327 [9]).



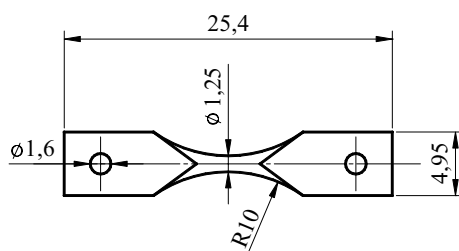
Rys. 2. Geometria próbki płaskiej: a) o stałym przekroju [9], b) o zmiennym przekroju [9]
 Fig. 2. Geometry flat specimens: a) of a fixed cross-section [9], b) of variable cross-section [9]

Normy definiują pole przekroju próbki wynikające z jego wymiarów (szerokość c , grubość b) i promień przejścia R . Określają ponadto sposób ich pobierania (obszar o jednorodnych parametrach struktury materiału i jednakowym ukie-

runkowaniu włókien), stałość parametrów obróbki, tolerancje wykonania, chropowatość powierzchni [10].

4.2. Badania zmęczeniowe z wykorzystaniem minipróbki

Minipróbki znalazły zastosowanie w badaniach eksperymentalnych materiałów konstrukcyjnych. Przykładem są badania pozwalające na wyznaczenie wytrzymałości gigacyklowej na stanowisku wykorzystującym ultradźwięki, gdzie częstotliwość zmiany obciążenia jest na poziomie 20 kHz [4]. Minipróbki są wykorzystywane do określenia wytrzymałości zmęczeniowej m.in. stali ferrytyczno-martensytycznej, z której produkowane są osłony reaktorów jądrowych. Ich zastosowanie jest zasadne z uwagi na ograniczoną objętość promieniowania neutronowego badanego obiektu [5]. Geometrię próbki wykorzystanej w tych badaniach przedstawiono na rysunku 3. Próbki o małych gabarytach pobierano z połączenia spawanego, gdzie weryfikowano własności wytrzymałościowe poszczególnych stref złącza [1].



Rys. 3. Geometria minipróbki wykorzystanej w badaniach stali napromieniowanej [5]
Fig. 3. Geometry of mini specimen used in the tests for irradiated steel [5]

5. METODYKA BADAŃ WŁASNYCH

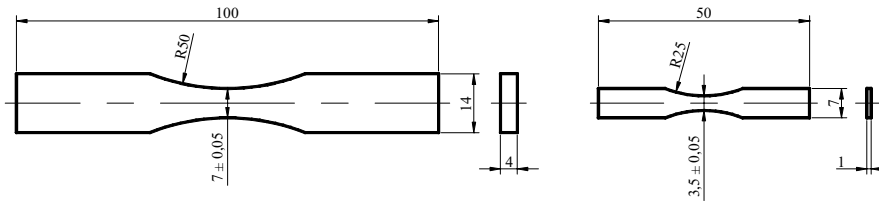
Weryfikacja przyjętych hipotez badawczych wymaga realizacji badań eksperymentalnych według zaproponowanej metodyki. Składa się na nią określenie materiału, geometrii badanych próbek, zakresu stosowanych obciążeń w zakresie wytrzymałości wysokocyklowej i stanowiska badawczego [14].

5.1. Materiał do badań

Badania realizowano, opierając się na materiale reprezentującym daną grupę metali. Wykorzystano stop aluminium EN AW-6063 T6, z którego produkowane są profile kształtowe o wymiarach uniemożliwiających pobranie próbki normatywnej.

5.2. Próbki

W ramach weryfikacji metodyki przeprowadzono badania zmęczeniowe dla geometrii próbki normatywnej i minipróbki. Przykładowe wymiary próbek przedstawiono na rysunku 4 [12].



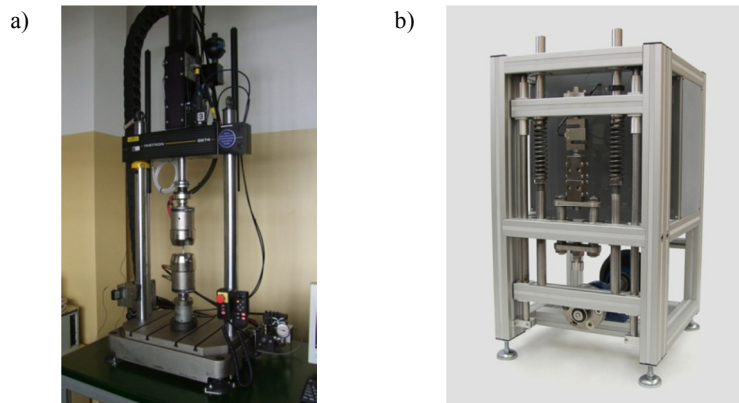
Rys. 4. Geometria próbki do badań zmęczeniowych: a) normatywna [9]; b) minipróbka [12]
 Fig. 4. Specimen geometry for the fatigue tests: a) normative [9]; b) mini specimen [12]

5.3. Stosowane obciążenia

Próbki badano z kontrolowanym naprężeniem. Stosowano obciążenia w zakresie zmęczenia wysokocyklowego z określoną wartością naprężenia średniego (cykl symetryczny, jednostronny). Zastosowano cykl zmiany obciążenia ze składową rozciągającą w celu wyeliminowania wybożenia się minipróbki.

5.4. Stanowiska badawcze

Badania przeprowadzono na serwohydraulicznej maszynie wytrzymałościowej Instron 8874 i stanowisku niestandardowym. Zastosowano w nim wymuszenie kinematyczne złożone z mimośrodru i układu podatnego (dwie równoległe sprężyny naciskowe). Wykorzystane stanowiska przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Stanowiska badawcze wykorzystane w badaniach: a) Instron 8874, b) własna konstrukcja
 Fig. 5. Test stands used in the tests: a) Instron 8874, b) own stand

6. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH

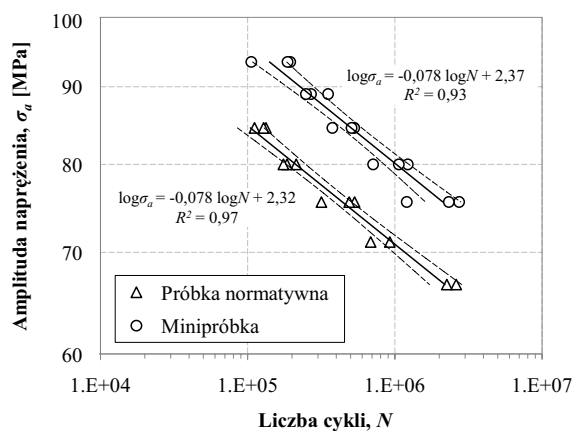
Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wyniki badań zmęczeniowych dla dwóch różnych geometrii próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-6063 T6. Punkty eksperymentalne opisano prostą regresji i przedziałem ufności. Uzyskana rozbieżność trwałości zmęczeniowych na danym poziomie wytrzymałości dla różnych geometrii próbek uwiaryściła wyraźny wpływ efektu

skali. Wyznaczono współczynnik wielkości przekroju w zakresie trwałości wysokocyklowej (równanie (1b) – $K_{HC} = 1,13$), który pokrywa się z prostą zamieszczoną na rysunku 1. Pochodzenie efektu skali dla próbek gładkich poddanych obciążeniom jednoosiowym jest klasyfikowane w ujęciu statystycznym. Szczegółowe analizy wyników w tym obszarze zamieszczono w pracy [11].

7. ANALIZA WYNIKÓW

Warunki badań minipróbki generują potrzebę analizy wpływu efektu skali i naprężenia średniego na wytrzymałość i trwałość zmęczeniową. W zakresie efektu skali weryfikowano wybrane modele efektu skali, a wyniki tych analiz zawarto w pracy [15]. Modele wykorzystano do analitycznego wyznaczenia wykresu σ_a-N dla próbki normatywnej na podstawie badań minipróbki. Najmniejsze błędy szacowania trwałości zmęczeniowej uzyskano na podstawie podejścia monofrakalnego [15].

Geometria minipróbki (wielkość przekroju, nieznaczna sztywność) charakteryzuje się niewielką odpornością na wyboczenie. Prowadzi to do konieczności stosowania obciążeń rozciągających ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max} > 0$). Wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa metali zależy od amplitudy naprężenia σ_a i naprężenia średniego σ_m . W celu oceny poprawności szacowania wykresu σ_a-N dla cykli symetrycznych ($R = -1$) wykonano analizy modeli wpływu naprężenia średniego, które zamieszczono w pracy [13].



Rys. 6. Krzywe σ_a-N wyznaczone dla stopu aluminium EN AW-6063 T6 [14]

Fig. 6. Curve σ_a-N obtained for the aluminum alloy EN AW-6063 T6 [14]

8. PODSUMOWANIE

Przytoczone wyniki badań eksperymentalnych umożliwią weryfikację hipotez badawczych w zakresie metodyki prowadzenia badań na minipróbkach i analizy matematycznych modeli efektu skali.

Trwałość i wytrzymałość zmęczeniowa minipróbki i próbki normatywnej wykonana z tego samego materiału jest inna. Efekt ten definiowany jest jako wrażliwością materiału na zmianę wielkości przekroju. Opis tej zależności realizowany jest z wykorzystaniem modeli efektu skali (np. teoria najslabszego ogniwa, podejście monofraktalne).

Badania na minipróbkach zawężają zakres warunków badań. W celu uniknięcia wyboczenia się próbki stosowane są cykle ze składową permanentnie rozciągającą (jednostronne, $R > 0$). W celu oszacowania charakterystyki innej (np. $R = -1$) niż oczekiwana, wykorzystuje się modele wpływu naprężenia średniego.

Wyniki badań eksperymentalnych na minipróbkach potwierdzają hipotezę o możliwości stosowania metodyki badań w zakresie obciążeń jednoosiowych dla wybranych materiałów konstrukcyjnych. W przypadku potrzeby otrzymania wyników o charakterze materiałowym niezbędnym jest uwzględnienie wpływu efektu skali i naprężenia średniego.

LITERATURA

- [1] Çam G., Erim S., Yeni., Koçak M.: Determination of mechanical and fracture properties of laser beam welded steel joints. *Welding Journal*, 1999, 193-201.
- [2] Carpinteri A., Chiaia B.: Multifractal scaling laws in the breaking behavior of disordered materials. *Chaos, Solitons & Fractals* 8(3), 1997, 135-150.
- [3] Carpinteri A., Spagnoli A.: Size effect in S-N curves. A fractal approach to finite-life fatigue strength. *International Journal of Fatigue* 31, 2009, 927-933.
- [4] Furuya Y.: Notable size effects on very high cycle fatigue properties of high-strength steel. *Materials Science and Engineering, A* 528, 2011, 5234-5240.
- [5] Hirose T., Tanigawa H., Ando M., Suzuki T., Kohyama A., Katoh Y., Narui M.: Evaluation of creep fatigue properties with miniature hourglass specimen. *Small Specimen Test Techniques. Fourth Volume*, 2002, 181-194.
- [6] Kocańda S.: Zmęczeniowe pękanie metali. WNT Warszawa, 1985.
- [7] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN Warszawa, 1997.
- [8] Lord J., Orkney L., Roebuck B. Validation of a miniature tensile strength measurement system. *Small Specimen Test Techniques. Fourth Volume. Journal of ASTM International* 2002, 234-250.
- [9] PN-74/H-04327, Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania – ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych.
- [10] PN-76/H-04325, Badania metali na zmęczenie – Pojęcia podstawowe i ogólne wytyczne przygotowania próbek oraz przeprowadzenia prób.
- [11] Tomaszewski T., Sempruch J.: Analysis of size effect in high-cycle fatigue for EN AW-6063, *Solid State Phenomena* 224, 2015, 75-80.
- [12] Tomaszewski T., Sempruch J.: Determination of the fatigue properties of aluminum alloy using mini specimen. *Material Science Forum* 726, 2012, 63-68.
- [13] Tomaszewski T., Sempruch J.: Practical implementation of selected mean stress models for results of fatigue tests realized for mini specimen. *Engineering Mechanics*, 2014, 664-667.
- [14] Tomaszewski T., Sempruch J.: Verification of the fatigue test method applied with the use of mini specimen. *Key Engineering Materials* 598, 2014, 243-248.
- [15] Tomaszewski T., Sempruch J., Piątkowski T.: Verification of selected models of size effect based on high-cycle fatigue testing on mini specimens made of EN AW-6063 aluminum alloy. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 52(4), 2014, 883-894.

- [16] Weibull W.: A statistical representation of fatigue failures in solids, Transaction of the Royal Institute of Technology 27, 1949.

USE OF MINI SPECIMENS FOR DETERMINING THE FATIGUE STRENGTH AND FATIGUE LIFE OF STRUCTURAL MATERIALS

Summary: This paper presents the research methodology for determining the fatigue properties of the material with the use of mini specimens. The hypotheses and research methodology were formulated. The results of size effect were analyzed.

Key words: high-cycle fatigue, mini specimen, σ_a - N curve