

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

3(2)/2014, 59-66

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Tomasz TOMASZEWSKI, Janusz SEMPRUCH

**ZAKRES NORMALIZACJI WARUNKÓW BADAŃ
ZMĘCZENIOWYCH MINIPRÓBEK**

Streszczenie: W pracy scharakteryzowano procedurę prowadzenia badań zmęczeniowych w oparciu o normy. Przedstawiono geometrię próbek gładkich, warunki prowadzenia badań i opis wyników w formie charakterystyki zmęczeniowej σ_a-N . Jako praktyczną możliwość rozszerzenia zakresu identyfikacji własności zmęczeniowych materiału zaproponowano metodykę badań na minipróbkach.

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

1. WPROWADZENIE

Większość eksploatowanych maszyn poddawana jest obciążeniom zmiennym w czasie. Tego typu obciążenia powodują złożony spłot zjawisk w materiale, w wyniku których następuje rozwój pęknięcia zmęczeniowego, powodujący zniszczenie elementu konstrukcyjnego [10]. Ze względu na złożoność tego procesu i wpływ na jego przebieg wielu czynników (m.in. obciążenia, czasu), proces traktowany jest jako fenomenologiczny, w którym brak bezpośredniego odwołania do rzeczywistej struktury materiału i fizycznego opisu zachodzących w nim zmian [9]. W procesie konstruowania istotnym czynnikiem jest uwzględnienie wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych. Z uwagi na rozwój nowych technologii produkcji, w nielicznych obszarach badań zmęczeniowych zauważyć można brak wiarygodnych procedur oceny własności zmęczeniowych. Skłania to do poszukiwania nowych metodyk badawczych rozwijających dotychczasowe, stosowane procedury.

Wyznaczenie charakterystyki zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych jest w wielu przypadkach utrudnione z uwagi na ograniczenia narzucane przez wytyczne normatywne definiujące geometrię próbek do badań, sposób ich pobierania i wykonywania, warunki prowadzenia badań (obciążenia, częstotliwość), przedstawienie wyników. Możliwe jest pobranie próbek wyłącznie z obiektów w ograniczonym zakresie gabarytowym. Rozszerzenie tego zakresu realizowane jest w wyniku zmniejszenia próbek. Jednakże ich wielkość powinna zapewnić wiarygodne określenie własności materiałowych. Oznacza to, że wymiary części roboczej próbki powinny być na tyle duże, aby badana objętość

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

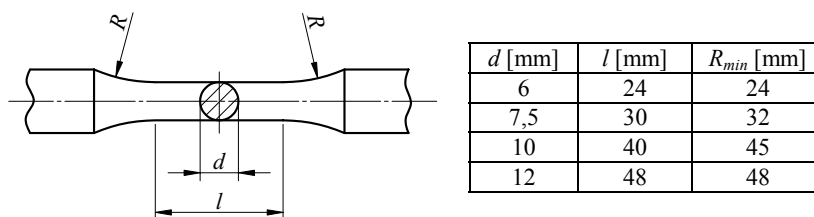
była reprezentatywna. W przypadku dużych ziaren lub materiałów o niejednorodnej strukturze (tzw. nieuporządkowanych), próbki powinny być proporcjonalnie większe [2].

Prowadzenie badań na próbach geometrycznie mniejszych (tzw. minipróbkach) rozszerza zakres identyfikacji materiału elementu konstrukcyjnego o ograniczonych gabarytach [19]. Minipróbki charakteryzują się ponadto niewielką objętością, która sprzyja realizacji pełnej próby zmęczeniowej w przypadku ograniczonej ilości dostępnego materiału badawczego. Dzięki temu możliwe jest określenie stopnia uszkodzenia obiektu eksploatowanego w stosunku do elementów nowego [11].

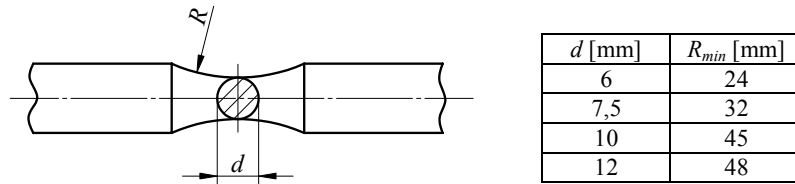
Minipróbki są wykorzystywane w badaniach o charakterze eksperymentalnym. Znalazły zastosowanie między innymi w przemyśle jądrowym, gdzie badano wpływ napromieniowania na wytrzymałość zmęczeniową stali. Stosowane są ze względu na ograniczoną objętość napromieniowania badanego obiektu [6]. Dzięki wykorzystaniu próbek o małym przekroju możliwe jest prowadzenie badań na niestandardowych stanowiskach badawczych. Przykładem są badania wytrzymałości gigacyklowej na stanowisku wykorzystującym ultradźwięki, gdzie częstotliwość zmiany obciążenia jest na poziomie 20 kHz [5]. Minipróbki są ponadto wykorzystywane do wyznaczenia własności materiału w strefie złącza spawanego. Z uwagi na niewielką objętość możliwe było ich pobranie z różnych jego obszarów (spoina, strefa wpływu ciepła, materiał rodzimy) [4]. Szczegółowy opis metodyki i wyników badań dla minipróbek został opisany m.in. w pracach [2, 3].

2. NORMALIZACJA GEOMETRII PRÓBEK

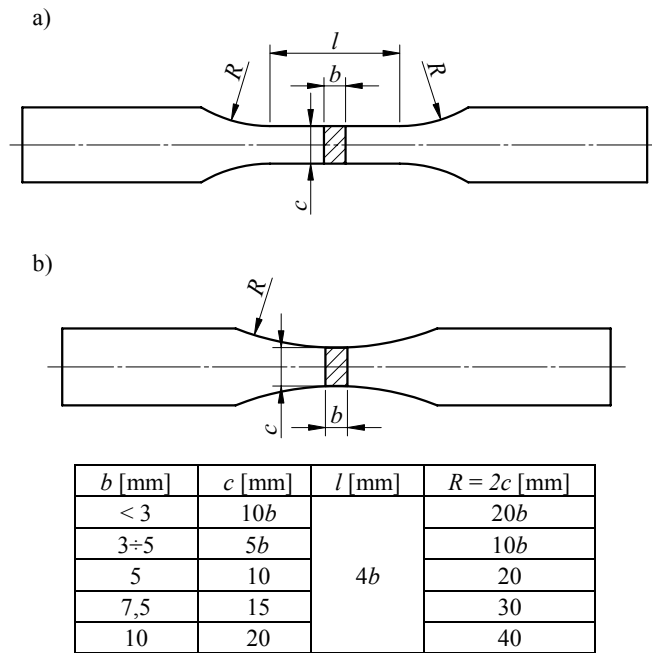
Ogólne wytyczne normatywne dotyczące geometrii próbek do badań zmęczeniowych narzucają ich wymiary gabarytowe i kształt, które są ustalone w zależności od warunków badań. Wybrane geometrie próbek normatywnych zgodne z normą PN-74/H-04327 [12] przedstawiono na rysunkach 1-3.



Rys. 1. Geometria próbki okrągłej o stałym przekroju [12]
Fig. 1. Geometry round specimens of a fixed cross-section [12]



Rys. 2. Geometria próbki okrągłej o zmiennym przekroju [12]
 Fig. 2. Geometry round specimens of variable cross-section [12]



Rys. 3. Geometria próbki płaskiej: a) o stałym przekroju, b) o zmiennym przekroju [12]
 Fig. 3. Geometry flat specimens: a) of a fixed cross-section, b) of variable cross-section [12]

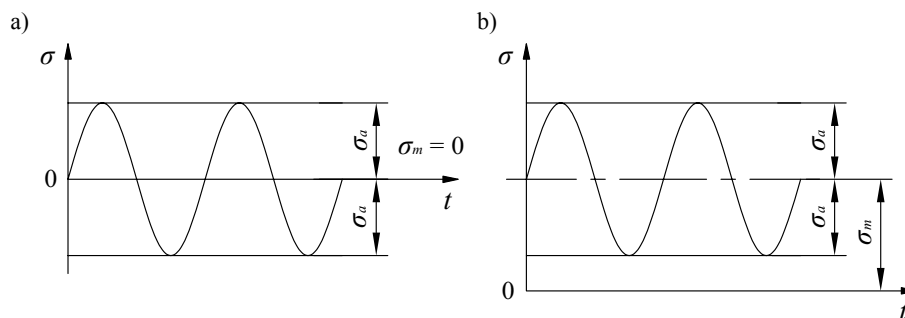
Wytyczne dotyczące przygotowania próbek płaskich do badań zmęczeniowych dla lotnictwa i kosmonautyki [16, 17] zakładają wymiary geometrii próbek okrągłych ($d \geq 4,5$ mm, $2d \leq l \leq 4d$, $6d \leq R \leq 8d$) i płaskich ($b > 3$ mm, $c > b$, $c > 5$ mm, $2c \leq l \leq 4c$, $6c \leq R \leq 8c$). W normie ASTM E-466 [1] zdefiniowano wymiary dla próbki okrągłej o stałym przekroju ($d = 5,08 \div 25,4$ mm, $R_{min} = 8 \times l$, $l = 2 \div 3 \times d$), próbki okrągłej o zmiennym przekroju ($d = 5,08 \div 25,4$ mm, $R_{min} = 8 \times d$) i próbki płaskiej ($c = b \cdot (2 \div 6$ mm), $R = 8 \cdot c$, $l = 2 \div 3c$, $A = 19,4 \div 645$ mm). Normalizacja geometrii próbek została również opisana w normach ISO [7, 8].

Badania zmęczeniowe prowadzone na próbkach z karbem szczegółowo opisano w normach [12, 14]. Geometria próbek uzależniona jest od sposobu ich obciążania (osiowe rozciąganie – ściskanie, zginanie) i badanego materiału (metale [12, 14], żeliwo i staliwo [15]).

Próbki do badań powinny być pobierane z obiektu o jednorodnych parametrach struktury materiału i jednakowym ukierunkowaniu włókien. W przypadku weryfikacji własności materiału obiektu eksploatowanego próbki pobierane są z obszaru występowania największych naprężeń. Należy zachować stałe parametry obróbki mechanicznej próbek. Temperatura obróbki nie powinna powodować zmian struktury materiału. Chropowatości powierzchni próbek gładkich nie może przekraczać wartości 1,25. Dopuszczalne odchyłki wymiarowe dla części pomiarowej nie mogą być większe niż 0,05 mm [13].

3. NORMALIZACJA STOSOWANYCH OBCIĄŻEŃ W BADANIACH ZMĘCZENIOWYCH

Badania zmęczeniowe metali sprowadzają się do cyklicznego obciążenia wywołującego zmienny stan naprężeń. Podstawowym obciążeniem do wyznaczenia własności zmęczeniowych materiału lub elementu konstrukcyjnego przyjęto cykl sinusoidalny. Parametry założonego cyklu do badań zakładają określenie wartości amplitudy naprężenia cyklu (σ_a) i naprężenia średniego cyklu (σ_m). Przykładowe cykle o różnej wartości współczynnika asymetrii cyklu ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) przedstawiono na rysunku 4. Wartości przyjętych poziomów naprężeń uzależnione są od zakresów wytrzymałości zmęczeniowej opisanych w punkcie 4.

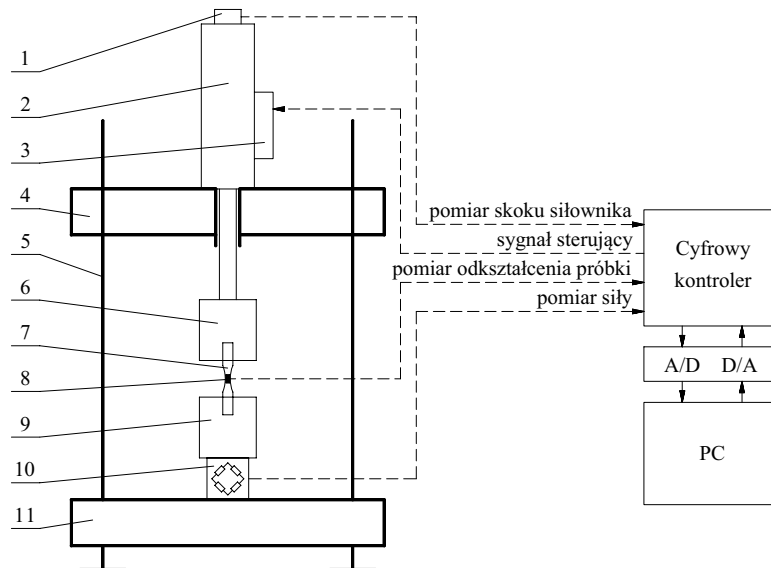


Rys. 4. Wykres cyklu sinusoidalnego: a) symetryczny ($R = -1$), b) jednostronnego ($R > 0$)
Fig. 4. Graph sinusoidal cycle: a) symmetric ($R = -1$), b) unilateral ($R > 0$)

Częstotliwość (f) zmian obciążenia powinna być w zakresie od 5 do 100 Hz [13] i stała dla danej serii próbek. Dobór częstotliwość uzależniony jest od parametrów maszyny wytrzymałościowej, na której realizowana jest próba. W przypadku wzrostu temperatury próbki podczas próby należy zapewnić jej chłodzenie, aby temperatura nie powodowała zmian własności materiału.

Do badań z kontrolowanym naprężeniem jako kryterium końca próby zmęczeniowej przyjmuje się makropęknięcia próbki [13]. Przełom musi wykazywać charakterystyczne cechy zmęczenia materiału. Badania powinny być realizowane na maszynie przystosowanej do realizacji badań zmęczeniowych dla danego rodzaju obciążenia. Najczęściej wykorzystuje się serwohydrauliczne

maszyny zmęczeniowe sterowane w pętli sprzężenia zwrotnego wymuszenia i pomiaru siły lub odkształcenia. Przykładowy schemat kinematyczny takiej maszyny przedstawiono na rysunku 5.



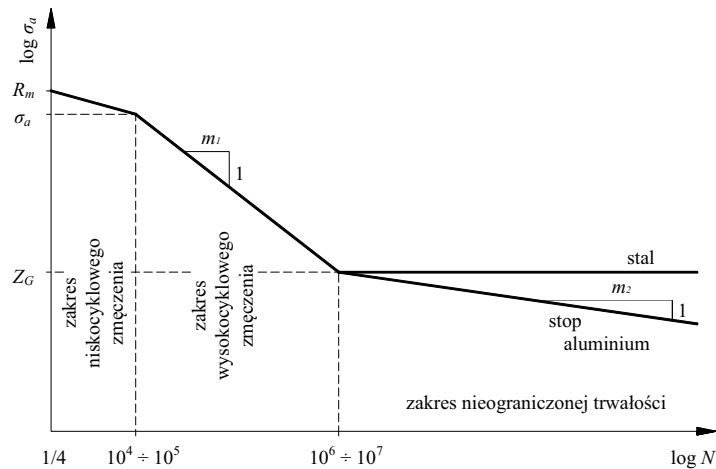
Rys. 5. Schemat kinematyczny serwohydraulicznej maszyny wytrzymałościowej do badań zmęczeniowych: 1 – liniowy zmienny transformator różnicowy (LVDT), 2 – siłownik hydrauliczny, 3 – serwowawór, 4 – górna belka, 5 – słup prowadzący belkę, 6 – uchwyt górny, 7 – próbka, 8 – tensometr lub ekstensometr, 9 – uchwyt dolny, 10 – tensometryczny czujnik siły, 11 – podstawa

Fig. 5. The kinematic scheme of servohydraulic material testing machine for fatigue tests: 1 – linear variable differential transformer (LVDT), 2 – hydraulic actuator, 3 – servovalve, 4 – top beam, 5 – beam guiding post, 6 – top holder, 7 – specimen, 8 – tensometer or extensometer, 9 – bottom holder, 10 – tensometric force sensor, 11 – base

Powyższe założenia dotyczą badania metali w zakresie obciążeń osiowych rozciąganie – ściskanie, zginanie i skręcania próbek gładkich lub z karbem. Opisane warunki badań zmęczeniowych w większości pokrywają się z dostępnymi normami polskimi i zagranicznymi.

4. CHARAKTERYSTYKA ZMĘCZENIOWA σ_a-N

Opis własności zmęczeniowych materiału w ujęciu naprężeniowym przedstawiany jest w postaci charakterystyki σ_a-N (wykres Wöhlera – rys. 6). Z uwagi na zależność rozwoju pęknięcia zmęczeniowego od poziomu naprężenia, odkształcenia, wykres podzielony jest na cztery zakresy (quasi-statyczna wytrzymałość, niskocyklowe zmęczenie, wysokocyklowe zmęczenie, nieograniczona trwałość) [9]. Podział na poszczególne zakresy jest orientacyjny.



Rys. 6. Krzywa σ_a - N w układzie bilogarytmicznym
 Fig. 6. σ_a - N curve plotted on bilogarithmic scale

W zakresie odkształceń sprężystych materiału wykres obejmuje dwa obszary – ograniczonej trwałości zmęczeniowej (zakres wysokocyklowy – obszar zawarty pod odcinkiem opisanym współczynnikiem kierunkowym m_1 , ale powyżej Z_G – jeżeli występuje) oraz nieograniczonej trwałości zmęczeniowej (stal – wyraźna granica zmęczenia, stop aluminium – prosta o nachyleniu m_2 [18]). Wykres zmęczeniowy w tych zakresach opisuje się równaniem:

$$C = N(\sigma_a)^{-1/m} \quad (1)$$

gdzie:

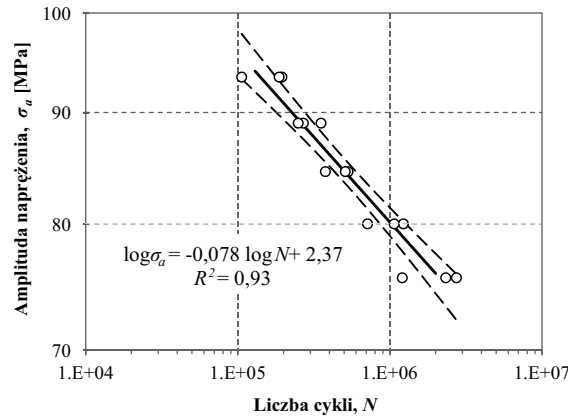
C – parametr stały krzywej σ_a - N ,

m – współczynnik kierunkowy,

w postaci logarytmicznej:

$$\log \sigma_a = m \log N + b \quad (2)$$

Przykładową charakterystykę zmęczeniową σ_a - N wyznaczoną w zakresie wysokocyklowym dla minipróbek wykonanych ze stopu aluminium przedstawiono na rysunku 7. W badaniach eksperymentalnych zastosowano próbkę (mniejszą niż w zaleceniach normatywnych) o wymiarach: $b = 1$ mm, $c = 3,5$ mm, $R = 25$ mm. Przyjęto częstotliwość zmiany obciążenia na poziomie 5 Hz. Zastosowano cykl zmiany obciążenia o współczynniku asymetrii cyklu $R = 0,1$, który eliminował wyboczenie się minipróbki. Szczegółowe sprawozdanie z badań opisano w pracy [19].



Rys. 7. Przykładowa krzywa σ_a - N dla minipróbki wykonanej ze stopu aluminium EN AW-6063
 Fig. 7. Example σ_a - N curve for the mini specimen made of aluminum alloy EN AW-6063

Wykres w zakresie wysokocyklowym powinien być wyznaczony dla przynajmniej 3 próbek na każdym z 5 poziomów naprężenia [13]. Dla wyników opisanych prostą regresji wyznacza się przedział ufności na poziomie istotności 0,95. Jako miarę dopasowania wyznaczonego modelu regresji stosuje się współczynnik determinacji (R^2), który określa rozrzut wyników badań. Powyżej wartości 0,8 przyjmuje się wiarygodność przeprowadzonej próby zmęczeniowej.

5. PODSUMOWANIE

Możliwym jest rozszerzenie zakresu identyfikacji własności cyklicznych materiału poprzez prowadzenie badań na próbkach geometrycznie mniejszych niż zalecane do stosowania przez normy. Na podstawie prezentowanych wyników badań można stwierdzić praktyczną możliwość wykorzystania metodyki w oparciu o próbkę niestandardową. Zakres modyfikacji wytycznych normatywnych dotyczy wyłącznie geometrii próbek. Pozostałe warunki badań (warunki wykonania próbek i przeprowadzenia próby, stosowane obciążenia, przedstawienie wyników) są zgodne z dostępnymi normami dotyczącymi badań zmęczeniowych.

LITERATURA

- [1] ASTM E-466, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.
- [2] BORÓŃSKI D.: Lokalne własności materiałowe w analizie zmęczeniowej. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego, Radom 2009.
- [3] CALLAGHAN M.D., HUMPHRIES S.R., LAW M., HO M., YAN K., YEUNG W.Y.: Specimen-size dependency and modelling of energy evolution during high-temperature low-cycle fatigue of pressure vessel steel. Scripta Materialia, Volume 65 Issue 4, 2011, 308-311.
- [4] ÇAM G., ERİM S., YENİ., KOÇAK M.: Determination of mechanical and fracture properties of laser beam welded steel joints. Welding Journal, 1999, 193-201.
- [5] FURUYA Y.: Notable size effects on very high cycle fatigue properties of high-strength steel. Materials Science and Engineering, A 528, 2011, 5234-5240.

- [6] 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.
- [7] ISO 1099:2006, Metallic materials – Fatigue testing – Axial force-controlled method.
- [8] ISO 1143:2010, Metallic materials – Rotating bar bending fatigue testing.
- [9] KOCANĀDA S.: Zmęczeniowe pękanie metali. WNT, Warszawa 1985.
- [10] KOCANĀDA S., SZALA J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN, Warszawa 1997.
- [11] 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.
- [12] PN-74/H-04327, Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania – ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych.
- [13] PN-76/H-04325, Badania metali na zmęczenie – Pojęcia podstawowe i ogólne wytyczne przygotowania próbek oraz przeprowadzenia prób.
- [14] PN-76/H-04326, Badania metali na zmęczenie – Próba zginania.
- [15] PN-84/H-04662, Żeliwo i staliwo – Badania na zmęczenie.
- [16] PN-EN 3987:2009, Lotnictwo i kosmonautyka – Metody badań materiałów metalowych – Próba zmęczeniowa o dużej liczbie cykli ze stałą amplitudą kontrolowanego obciążenia.
- [17] PN-EN 6072:2010, Lotnictwo i kosmonautyka – Materiały metalowe – Metody badań – Próba zmęczeniowa przy stałej amplitudzie.
- [18] SONSINO C. M.: Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. International Journal of Fatigue, 29, 2007, 2246-2258.
- [19] TOMASZEWSKI T., SEMPRUCH J.: Determination of the fatigue properties of aluminum alloy using mini specimen. Material Science Forum, 726, 2012, 63-68.

RANGE STANDARDIZATION OF FATIGUE TESTING CONDITIONS FOR MINI SPECIMENS

Summary: The paper was characterized procedure for conducting fatigue tests based on the standards. The geometry of the smooth specimens, conditions of tests and description of the results (fatigue characteristics σ_a-N) was presented. As a practical opportunity to extend the scope of the identification of fatigue properties of the material proposed methodology for testing the mini specimens.

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