

**Aleksander ŚWITAŁA, Janusz SEMPRUCH**

## **WERYFIKACJA METODYKI BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻENIA Z WYKORZYSTANIEM PŁASKICH PRÓBEK ROMBOIDALNYCH**

W pracy przedstawiona została weryfikacja metodyki [6] badań zmęczeniowych realizowanych w założonym dwuosiowym stanie naprężenia, z wykorzystaniem próbek romboidalnych. Badania są prowadzone na jednoosiowej maszynie wytrzymałościowej z wykorzystaniem specjalnie dla tego celu opracowanego przyrządu. W pracy zawarto informację na temat zaprojektowanego przyrządu, wstępnego ukształtowania próbek oraz przyjętego zakresu weryfikacji. Próbkę wykorzystywane w podstawowym programie badań wykonane były ze stali 45.

Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny  
al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

### **1. WSTĘP**

W procesie poznawania zjawisk zmęczeniowych podstawową rolę odgrywają badania doświadczalne. W szeregu ośrodków prowadzone są w ostatnich latach prace, zmierzające do opracowania metody badań w stanie złożonego stanu odkształcenia/naprężenia.

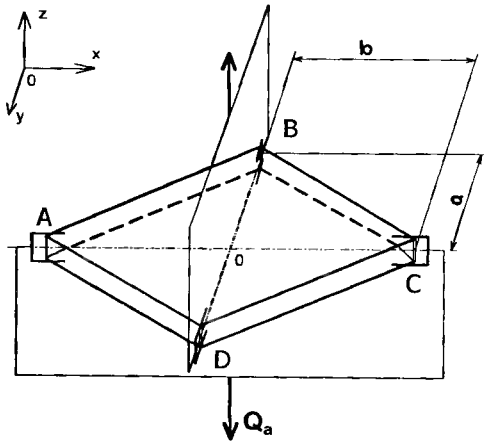
Na podstawie analizy literatury [1-5] zauważyć można pewną różnorodność metod stosowanych w badaniach zmęczenia wieloosiowego. Większość z proponowanych metod ma jednak zasadniczą wadę: wymagają bardzo kosztownych stanowisk badawczych (multiplikowanie osi obciążenia na maszynach wytrzymałościowych). Przeciwwagą dla tych metod wydaje się być sposób wyznaczania wieloosiowych własności zmęczeniowych przy wykorzystaniu jednoosiowej maszyny wytrzymałościowej i specjalnie zaprojektowanych przyrządów, wywołujących złożony stan naprężenia/odkształcenia. Spośród tych metod na wyróżnienie zasługuje metoda zaproponowana przez Zamrika i współautorów [6].

### **2. METODA BADAŃ**

Zamysł proponowanej metody został zaczerpnięty z pracy [6]. Autorzy wspomnianej pracy prowadzili – na skonstruowanym przez siebie stanowisku – badania próbek wykonanych ze stopów tytanu. Próbkę te charakteryzowały się kształtem przypominającym w rzucie płaskim romb oraz relatywnie niewielką grubością. Badania przeprowadzono na trzech typach próbek, tj. dla stosunku przekątnych próbki kolejno 1, 1,5 i 2. Autorzy wskazanej pracy założyli, że dzięki wykorzystaniu specjalnie ukształtowanych próbek oraz za sprawą cyklicznie zmiennych obciążeń jednoosiowych możliwe jest uzyskanie założonego dwuosiowego płaskiego stanu naprężenia na powierzchni próbek. Ze względu na sposób obciążenia próbki (momentem gnącym) stan naprężenia na jej powierzchni był determinujący z punktu widzenia procesu inicjacji pęknięcia zmęczeniowego.

Celem niniejszej pracy jest weryfikacja samej metodyki, jak i możliwości zastosowania tej metody w badaniach próbek stalowych.

Próbki wykorzystywane w badaniach miały kształt zobrazowany na schemacie przedstawionym na rysunku 1.



Rys. 1. Próbką romboidalną i sposób jej obciążenia wg [6]

Próbkę taką można potraktować jako złożenie dwóch belek o jednakowej wytrzymałości ze względu na zginanie. Osie tak postrzeganych belek pokrywają się z przekątnymi próbki. W szczególnym przypadku, gdy przekątne są sobie równe, próbka przyjmuje postać kwadratu (w części pomiarowej). Interesującą nas cechą próbek o takim kształcie jest założony w pracy [6] jednorodny rozkład odkształceń i naprężeń w szerokim obszarze powierzchni próbki, poddanej obciążeniu zgodnie z rysunkiem 1.

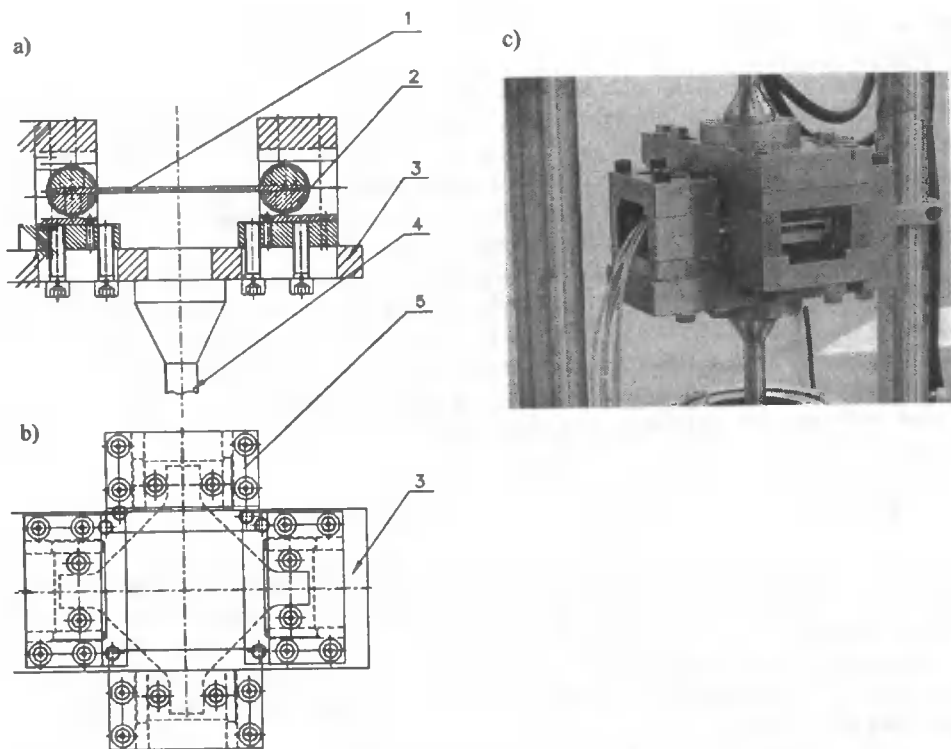
Stan naprężenia na powierzchni próbki pokazanej na rysunku 1, z wykorzystaniem wprowadzonych tam oznaczeń, można scharakteryzować dla obciążenia wahadłowo zmiennej zależnością (1):

$$\frac{\sigma_{1a}}{\sigma_{2a}} = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (1)$$

### 3. STANOWISKO BADAWCZE

Dla realizacji obciążenia zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1 zestawiono stanowisko badawcze, które składa się z dwóch podstawowych elementów: zaprojektowanego przyrządu ustalającego i mocującego próbkę w przestrzeni roboczej maszyny wytrzymałościowej oraz uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej INSTRON 8510. Zaprojektowany przyrząd pozwala na takie obciążenie próbki, aby na jej powierzchni pomiarowej uzyskany został założony stan naprężenia.

W przyrządzie tym (rys. 2) próbka jest zamocowana w czterech elementach mocujących, które z kolei umieszczone są parami w uchwytach, obróconych względem siebie o  $90^\circ$  w płaszczyźnie prostopadłej do osi maszyny. Jeden z uchwytów jest związany z trawersem, a drugi z tłokiem maszyny.



Rys. 2. Przyrząd: a) część dolna z zamocowaną próbką, b) widok na kompletny, zmontowany przyrząd, c) przyrząd wraz z zamocowaną próbką umieszczony w przestrzeni roboczej maszyny wytrzymałościowej, z lewej strony widoczne są przewody od tensometrów; 1 – próbka, 2 – łożysko, 3 – płyta dolna, 4 – trzpień mocujący, 5 – płyta górna

Podczas projektowania przyrządu przyjęto założenie, że odbierać on będzie tylko jeden stopień swobody w miejscu mocowania próbki, tj. w kierunku osi z (zgodnie z rysunkiem 1). Dlatego utwardzone elementy mocujące, pełniące rolę łożysk, mają możliwość obrotu względem własnej osi, przesuwania wzdłuż osi x i w ograniczonym zakresie w kierunku osi y.

W trakcie badań możliwe jest dokonywanie pomiarów odkształceń na powierzchni próbki. Aby zsynchronizować sygnały z kanałów maszyny (siła i przemieszczenie tłoka) oraz pomiary wykonywane bezpośrednio na powierzchni próbki, stanowisko badawcze wyposażono dodatkowo w zewnętrzny wzmacniacz tensometryczny, obsługujący wszystkie kanały pomiarowe. Sposób zabudowania przyrządu w przestrzeni roboczej maszyny wytrzymałościowej pokazano na rysunku 2c. Jest na nim widoczne także wyprowadzenie przewodów od czujników tensometrycznych naklejonych na powierzchni próbki.

Przyjęte w procesie projektowo-konstrukcyjnym i zrealizowane ukształtowania przyrządu pozwalają na zamocowanie próbek o różnych stosunkach długości przekątnych próbki (od 150 do 300 mm) oraz w pewnym zakresie na zmianę ich grubości (od 4 do 9 mm). Przyjmuje się, że minimalne luzy w obszarze łożyska 2 (rys. 2) nie mają wpływu na przebieg badań (nie ujawniają się na wykresach odkształceń, mierzonych na powierzchni próbki i rejestrowanych podczas próby).

#### 4. WARUNKI BADAŃ

Badanym materiałem była stal konstrukcyjna 45 w stanie ulepszonym cieplnie. Próbki wycinane były z arkusza blachy, poddawane obróbce cieplnej (wygrzewanie w piecu, w skrzynkach z piaskiem, w temperaturze 850°C, przez 30 minut, następnie studzenie w strumieniu powietrza) w celu ujednorodnienia struktury oraz polepszenia właściwości wytrzymałościowych. Następnie próbki poddane zostały obróbce wykańczającej, tj. czyszczeniu metodą szczotkowania oraz szlifowaniu.

Próbki obciążane były w sposób wahadłowo zmienny. Wartość amplitudy obciążenia dobierano każdorazowo w ten sposób, aby na powierzchni próbki występowały naprężenia równe  $0,8 R_e$  (około 9 kN siły na tłoku maszyny dla próbki o grubości równej 8 mm). Próba była realizowana do momentu pojawienia się pęknięcia próbki lub wyraźnego spadku siły na tłoku. Założenie to przyjęto dlatego, że na obecnym etapie badań interesującym jest także ukształtowanie makrofraktograficzne pęknięcia (i jego położenie).

#### 5. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA STANOWISKA

Weryfikacja stanowiska polegała na przeprowadzeniu badań na próbkach, w których stosunek długości przekątnych wynosił 1:1 lub 1:1,5, w warunkach obciążeń cyklicznie (wahadłowo) zmiennych. W początkowym etapie badania były prowadzone w ten sposób, że wielkością kontrolowaną podczas próby była siła. Ostatecznie zdecydowano się na sterowanie siłą przez pierwszą część próby i przemieszczeniem przez pozostałą część próby.

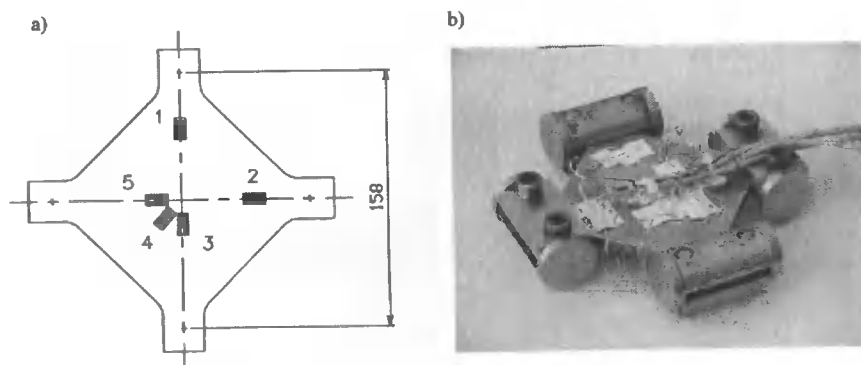
Podczas prowadzenia badań przyrząd działał zgodnie z założeniami, tzn. możliwe było uzyskanie założonego stanu odkształcenia na powierzchni próbki (potwierdzonego pomiarami tensometrycznymi). Głównym problemem ujawnionym podczas weryfikacji były pojawiające się luzy w obszarze punktów mocowania próbki. Po skończonej próbie są one kasowane (poprzez korektę niektórych wymiarów). Odczuwalną niedogodnością jest również kłopotliwa obserwacja powierzchni próbki. Jako niedogodność należy uznać także małą sztywność próbek w płaszczyźnie poprzecznej i wynikającą stąd dużą amplitudę przemieszczeń tłoka maszyny, warunkującą małą częstotliwość wymuszania obciążenia.

W ogólności jednak można na podstawie przeprowadzonej weryfikacji stwierdzić przydatność przygotowanego przyrządu do badań próbek w złożonym stanie naprężenia na jednoosiowej maszynie wytrzymałościowej. Uznano, że stanowisko pozwala na podjęcie weryfikacji metodyki badawczej.

#### 6. WERYFIKACJA PODSTAWOWYCH ZAŁOŻEŃ METODYKI BADAWCZEJ

Podstawowym elementem prezentowanej metodyki badawczej jest założenie jednorodności stanu naprężenia na powierzchni badanej próbki. Dla weryfikacji tego założenia zrealizowano i przeanalizowano pomiary tensometryczne w wybranych punktach (kierunkach) na powierzchni zamocowanej próbki. Dokonano także obserwacji pęknięć (miejsca ich inicjacji i makrofraktografii), pojawiających się w wyniku finalnym próby zmęczeniowej.

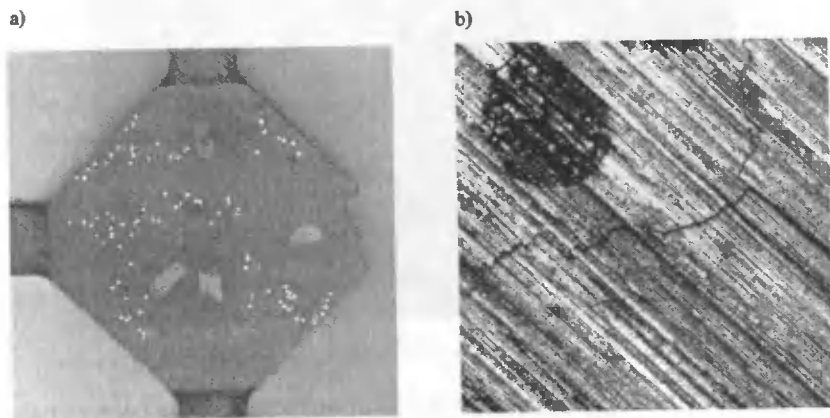
Tensometry (10 szt.) zostały naklejone w układzie półmostka (rys. 3). Podczas próby rejestrowano wartości odkształceń w punktach wskazanych na rysunku 3a.



Rys. 3. Sposób umieszczenia tensometrów na próbkach:  
 a) rozmieszczenie tensometrów na próbce,  
 b) próbka przygotowana do badań

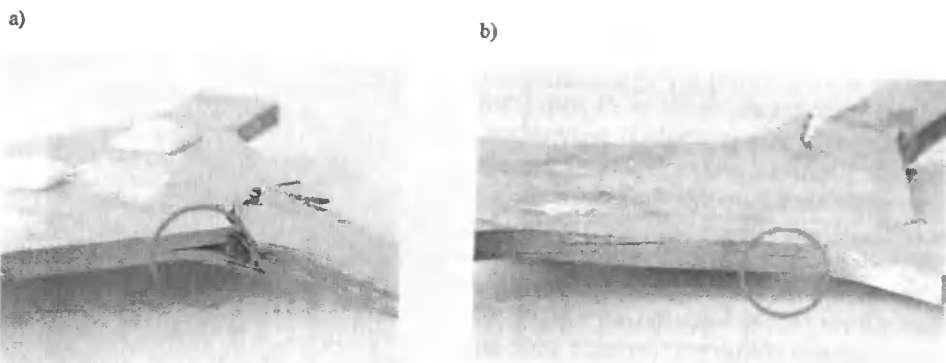
Przeprowadzone pomiary tensometryczne wykazały, że w miejscu naklejenia czujników tensometrycznych 1, 2, 3 i 5 (oznaczenia za rysunkiem 3a) uzyskano (z dokładnością pomiarową) takie same wartości naprężeń normalnych. Pozwala to sformułować wniosek o jednorodności rozkładu naprężeń w części środkowej próbki.

Badania makrofotograficzne pozwoliły zaobserwować na powierzchni próbki wiele gęsto rozsianych punktów inicjacji pęknięć zmęczeniowych (rys. 4). Siatkę zaobserwowanych na powierzchni próbki krótkich pęknięć (obserwowanych przy powiększeniach uzyskiwanych na mikroskopie warsztatowym) ilustrują białe punkty na rysunku 4a.



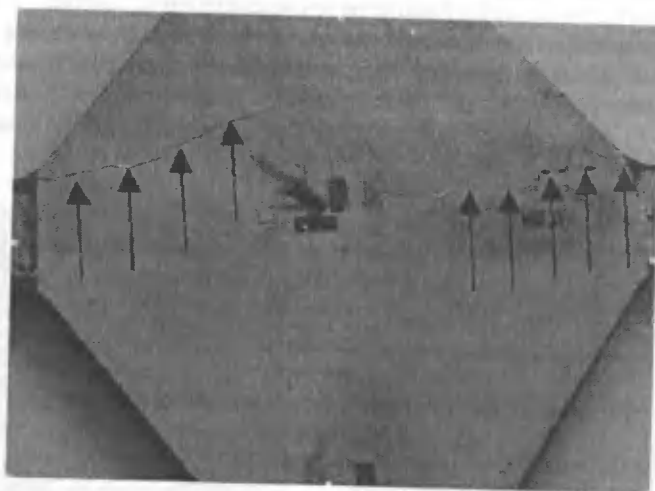
Rys. 4. Mikropęknięcia zaobserwowane na zniszczonych próbkach:  
 a) rozmieszczenie pęknięć na powierzchni próbki,  
 b) jedno z zaobserwowanych pęknięć w powiększeniu (ok. 25×)

Powiększenie jednego z nich pokazano na rysunku 4b (widoczny czarny punkt obok pęknięcia to marker, naniesiony pod mikroskopem). Pęknięcie finalne badanej próbki przebiegało w okolicy części chwytowej. Fakt ten zilustrowano na rysunku 5. Zauważalny tutaj przebieg pęknięcia na krawędzi bocznej próbki skłonił do podjęcia innej obróbki cieplnej.



Rys. 5. Pęknięcia na krawędzi bocznej próbki:  
 a) zniszczona próbka  
 b) pęknięcie na krawędzi bocznej próbki

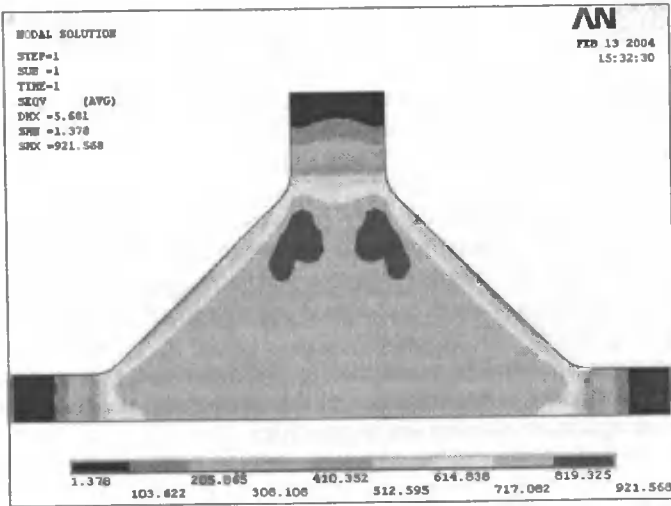
Fakt inicjowania makropęknięcia determinującego trwałość końcową próbki w obszarze części chwytowej zaobserwowano także dla próbki o stosunku długości przekątnych 1:1,5 (rys. 6). Próbka ta podlegała już zmodyfikowanej obróbce cieplnej.



Rys. 6. Próbka ( $a/b = 1,5$ ); strzałkami zaznaczono pęknięcie

## 7. ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ NA POWIERZCHNI PRÓBKII Z WYKORZYSTANIEM MES

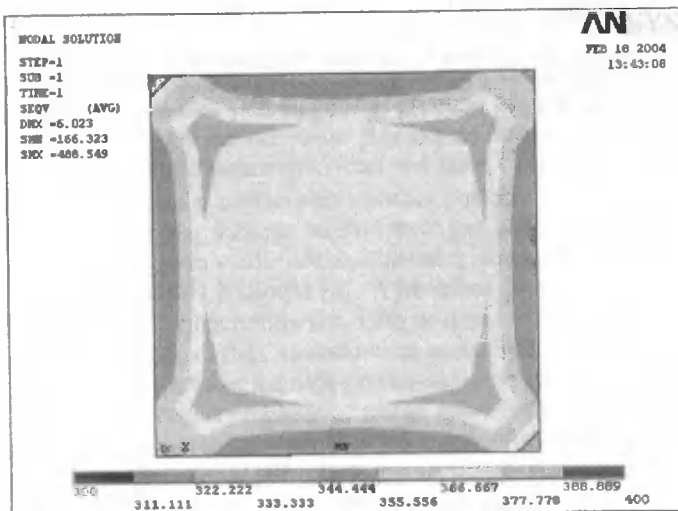
W celu interpretacji uzyskiwanych makropęknięć przeprowadzono badania numeryczne rozkładów naprężeń na powierzchni próbek wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych. Wykonano je metodą elementów skończonych w środowisku programu ANSYS. Obliczenia miały charakter trójwymiarowych analiz strukturalnych próbek o zadanych własnościach geometrycznych i mechanicznych, odpowiadających użytemu materiałowi, badanych w warunkach brzegowych wynikających z konstrukcji przyrządu (rys. 7).



Rys. 7. Rozkład naprężeń zredukowanych uzyskany przy pomocy analizy MES

W ich wyniku uzyskano mapy naprężeń zredukowanych, których rozkład wykazuje zaburzenia jednorodności rozkładu naprężeń w części roboczej próbki (okolice części chwytowej próbki). Uzyskane rozkłady uzasadniają w części eksperymentalne wyniki makrofraktograficzne. Widać wyraźnie odciążone krawędzie próbki oraz koncentracje naprężeń w pobliżu części chwytowej. Uzyskany wynik wskazuje na konieczność dalszego poszukiwania optymalnego kształtu próbki.

Przeprowadzono obliczenia numeryczne dla próbki kształtowanej z zachowaniem dotychczasowych ustaleń (próbka mocowana na końcach przekątnych), bez modyfikacji jej kształtu w obszarze punktów mocowania. Uzyskane rezultaty przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Rozkład naprężeń zredukowanych uzyskany za pomocą analizy MES dla próbki kwadratowej

Na rysunku tym zaznaczają się nadal obszary zróżnicowanego poziomu naprężenia, jednak gradient ich zmian w poszczególnych obszarach próbki jest zdecydowanie mniejszy.

Uzyskany tu rozkład będzie podstawą do ostatecznego ukształtowania próbki.

## 8. PODSUMOWANIE

1. Przeprowadzone badania potwierdziły celowość wykorzystania proponowanej metodyki w badaniach zmęczeniowych dla złożonego stanu naprężenia (odkształcenia).
2. Wykonany przyrząd umożliwia realizację praktyczną prób zmęczeniowych zgodnie z opisaną metodyką dla próbek w zakresie zmienności długości przekątnych od 150 do 300 mm i grubości od 4 do 9 mm.
3. Badania wstępne pozwoliły na uzyskanie pierwszych wyników wskazujących na możliwości poprawnego kształtowania próbki dla potrzeb badań zmęczeniowych realizowanych zgodnie z prezentowaną metodyką.

## LITERATURA

- [1] Bartolotta P.A., Kantzos P., Krause D.L.: In-plane biaxial yield surface study of cast titanium aluminide (TiAl). Proc. of the 5<sup>th</sup> International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture, Cracow, Poland, 1997, vol. 2, 389-402.
- [2] Baum C., Ott W., Trautmann K.H., Buczynski A., Nowack H.: Evaluation of the multiaxial crack initiation life prediction method EVICD for a modern tubes steel. Proc. of the 6<sup>th</sup> International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture, Lisboa, Portugal, 2001, vol. 1, 415-422.
- [3] Blass J.J., Findley W.N.: The influence of the intermediate principal stress on fatigue under triaxial stresses. Materials Research & Standards, vol. 7, no. 6, 1967, 254-261.
- [4] El-Magd E., Mielke S.: Dauerfestigkeit bei überlagerter zweiachsiger statischer Beanspruchung. Konstruktion 29, 1977, 253-257.
- [5] Cichański A., Świtłała A.: Przegląd doświadczalnych metod badania dwuosowego zmęczenia. Zesz. Nauk. ATR, Bydgoszcz 2002, 5-16.
- [6] Zamrik S.Y., Ledger D.J., Dante C.: Fatigue characteristics of thin titanium plates due to biaxial stress cycling. Proc. of the 5<sup>th</sup> International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture, Cracow, Poland, 1997, vol. 2, 167-187.