XXII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania
Bydgoszcz - Pieczyska, maj 2008, ss. 321-328

Jacek SUSZEK

ZASTOSOWANIE MINIPRÓBEK MATERIAŁOWYCH W OCENIE STANU ZMĘCZENIA – BADANIE WPŁYWU WIELKOŚCI PRZEDMIOTU

Eksploatacja obiektów technicznych w warunkach obciążeń zmiennych w czasie niesie ze sobą zagrożenia związane ze zmęczeniowym pękaniem elementów konstrukcyjnych. Cyklicznie zmienne obciążenie może prowadzić do stopniowej degradacji struktury, aż do inicjacji i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego. W artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań mających na celu zastosowanie w ocenie stanu zmęczenia elementów konstrukcyjnych w fazie do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego minipróbek materiałowych poddawanych obciążeniom odwzorowującym odkształcenia w elemencie konstrukcyjnym.

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, al. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

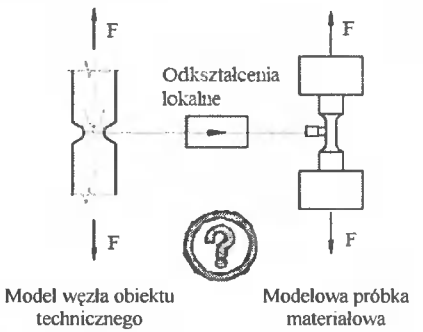
Rozwój projektowanych współcześnie obiektów technicznych zmierzający między innymi do poprawy uzyskiwanych osiągów wymaga stosowania nowych technologii wykonania i nowych materiałów, co może w przypadku braku odpowiedniego rozpoznania ich własności powodować duże zagrożenie dla środowiska lub nawet życia ludzkiego [1]. Podczas ich użytkowania w poszczególnych elementach konstrukcyjnych występują niejednokrotnie złożone i zmienne stany naprężeń mechanicznych, mogące prowadzić do efektów zmęczeniowych.

Przeciwdziałanie skutkom zmęczenia prowadzi się zarówno na etapie procesu projektowo-konstrukcyjnego, jak i na etapie eksploatacji już wytworzonych obiektów. W pierwszym przypadku dotyczy to stosowania metod „*fatigue design*" (konstruowanie ze względu na przeciwdziałanie zmęczeniowemu pękaniu). W drugim obszarze niezwykle istotna jest możliwość diagnozowania stanu zmęczenia konstrukcji zarówno w zakresie do inicjacji, jak i na etapie rozwoju pęknięcia zmęczeniowego. W tym celu wykorzystywane mogą być różnego rodzaju narzędzia diagnostyczne, które są bardziej lub mniej skuteczne i nie zależy to nie tyle od samej metody, ale głównie od możliwości jej zastosowania [2].

Przebieg procesu zmęczenia w elementach konstrukcyjnych w okresie do inicjacji pęknięcia zależy w dużej mierze od poziomu zmiennych odkształceń w obszarach ich koncentracji. Z powyższego stwierdzenia wynikają podstawowe problemy diagnozowania złożonych obiektów. Ciągła niedoskonałość teoretycznego opisu procesu zmęczenia, związana m.in. z wykorzystywanymi w nich teoretycznymi modelami analizy odkształceń lokalnych sprawia, że metody obliczeniowe nie mogą stanowić w pełni wiarygodnej podstawy metod diagnozowania złożonych obiektów technicznych opartych na ocenie odkształceń lokalnych.

Z tego względu zaproponowano metodę oceny stanu uszkodzenia zmęczeniowego, w której zastosowano modelowanie fizyczne, zarówno w zakresie samego obiektu, jak i jego obciążania.

Istota prezentowanego podejścia do diagnozowania stanu uszkodzenia zmęczeniowego obiektu w fazie inicjacji pęknięcia oparta jest na założeniu o możliwości odwzorowania przebiegu zmęczenia w strefie zmęczeniowego pękania elementu konstrukcyjnego w reprezentującej ją jednorodnej próbce materiałowej, stanowiącej fizyczny model rozpatrywanego obszaru elementu konstrukcyjnego. Odwzorowanie to odbywa się poprzez przeniesienie lokalnego stanu obciążenia w rozpatrywanym obszarze elementu konstrukcyjnego na model (minipróbkę) o celowo dobranych cechach materiałowych i geometrycznych, co zobrazowano na rysunku 1.



Rys. 1. Schematyczne ujęcie rozpatrywanego problemu

Jednym z warunków poprawności założenia przyjętego w omawianej w pracy metodzie jest zapewnienie maksymalnej reprezentatywności modelu diagnozowanego obszaru elementu konstrukcyjnego. Dla zapewnienia podstawowej cechy prawidłowo opracowanego modelu, jaką jest zdolność do zastępowania badanego obiektu w procesie jego badań, konieczne jest spełnienie szeregu warunków. Aktualna wiedza z zakresu zmęczenia materiałów i konstrukcji stanowi podstawę stwierdzenia, że w przypadku analizy stanu zmęczenia warunki te dotyczą zarówno własności materiałowych i cech geometrycznych, jak i warunków obciążenia i oddziaływania otoczenia. Związane jest to m.in. z koniecznością uwzględnienia wpływu zmęczeniowych własności materiału, naprężeń własnych oraz efektu skali i wielkości przedmiotu, co opisywane jest w wielu publikacjach [3, 4, 5].

Najkorzystniejszym sposobem zapewnienia pełnego podobieństwa podstawowych własności materiału jest wykonanie testowanych próbek z tej samej dostawy materiału, z której wykonany jest badany obiekt. W tym celu koniecznym jednak jest wykonywanie próbek do badań już na etapie wytwarzania obiektu.

Ponadto, w celu zapewnienia maksymalnego podobieństwa zmęczeniowych własności materiału modelu i elementu konstrukcyjnego (w analizowanym obszarze), niezbędne jest odtworzenie wszystkich istotnych z punktu widzenia zmęczenia zabiegów technologicznych związanych z wytwarzaniem badanego elementu.

W wielu przypadkach, w rozpatrywanych strefach analizowanych elementów konstrukcyjnych mogą występować naprężenia własne, często w istotny sposób wpływające na ich trwałość zmęczeniową. Niezbędnym zatem jest doskonalenie metod umożliwiających teoretyczną lub doświadczalną analizę stanu odkształceń i naprężeń wywołanych

zastosowanymi zabiegami technologicznymi, procesem montażu i innymi czynnikami. Wyznaczone odkształcenia/naprężenia własne można następnie uwzględnić w procesie obciążenia próbki materiałowej, np. wprowadzając „offset" obciążenia odpowiadający ich obliczonym lub zmierzonym wartościom [6].

Jednym z założeń proponowanej metody jest dążenie do minimalizacji wymiarów próbek stanowiących model analizowanych obiektów. Istnieje jednak niebezpieczeństwo dużego odstępstwa od stanu rzeczywistego w przypadku znacznego miniaturyzowania próbek. Wynika to z kilku czynników. Po pierwsze, ze znanego w analizie zmęczeniowej wpływu wielkości przedmiotu, będącego m.in. efektem probabilistycznego charakteru procesu zmęczenia. Po drugie, pobieranie próbek o wielkości nieznacznie przekraczającej wymiary charakterystyczne badanych materiałów (wymiary ziarna, kryształu, krystalitu) może spowodować, że prowadzone badania będą odnosić się do pojedynczych składników strukturalnych, nie zaś do ich „uśrednionego" zachowania w złożonej strukturze metalograficznej, jaka najczęściej występuje w materiale elementów konstrukcyjnych.

2. PRZEBIEG BADAŃ WERYFIKACYJNYCH

2.1. Etapy badań

Analiza powyższego zagadnienia prowadzona była w dwóch etapach. W pierwszym etapie przeprowadzono wstępną weryfikację możliwości diagnozowania stanu zmęczenia elementów z nieciągłościami geometrycznymi poprzez monitorowanie odkształceń lokalnych w strefie spiętrzeń naprężeń i ich odwzorowanie na próbkach materiałowych.

W drugim etapie przeprowadzono analizę, która miała na celu opracowanie zależności określających wpływ zmiany wielkości próbek. Badania te przeprowadzono przy kontrolowanej wartości odkształcenia, wykorzystując przebieg zmienności obciążenia, dla którego współczynnik asymetrii cyklu $R = -1$.

2.2. Obiekty przyjęte do badań

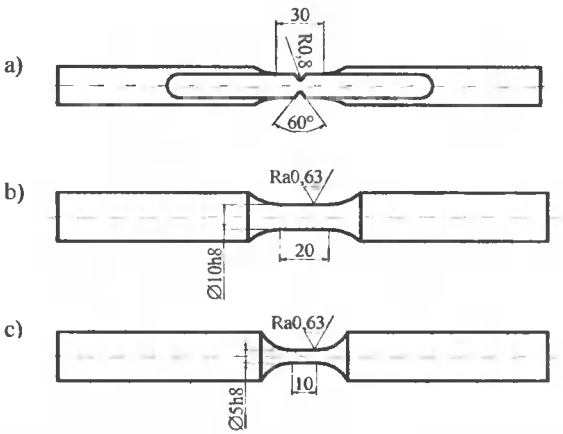
W badaniach wstępnych jako obiekt przyjęto próbkę z karbem geometrycznym o promieniu $R = 0{,}8$ mm (rys. 2a), która w sposób uproszczony odzwierciedla miejsce spiętrzenia naprężeń i odkształceń w elemencie konstrukcyjnym, oraz próbkę normatywną, przedstawioną na rysunku 2b. Na dnie karbu geometrycznego mierzono wartość odkształceń lokalnych z zastosowaniem technik tensometrycznych (m.in. za pomocą tensometrów o bazie 0,5 mm).

Obiekt badań i próbka materiałowa wykonane zostały z węglowej stali 45 (C45).

W badaniach weryfikacyjnych wykorzystano przebieg eksploatacyjny FALSTAFF dotyczący badań struktur lotniczych, który szczegółowo opisany został w literaturze [10].

Próbka materiałowa do badania wpływu skali zaprojektowana została zgodnie z normą do badań niskocyklowych [7]. Próbki do badań przedstawiono na rysunkach 2b i 2c. W badaniach przyjęto próbki wykonane ze stali 45 i 18G2A (odpowiedniki ich według nowych norm to C45 i S355J2G3).

Wymiary minipróbki zostały tak dobrane, że średnica oraz długość pomiarowa zmniejszone zostały dwukrotnie, co daje czterokrotne zmniejszenie pola przekroju poprzecznego. Takie podejście gwarantuje podobieństwo geometryczne obu badanych obiektów.



Rys. 2. Obiekty do badań: a) model węzła obiektu technicznego, b) próbka wykonana zgodnie z normą do niskocyklowych badań zmęczeniowych [7], c) minipróbka

Własności badanych materiałów wyznaczono w warunkach obciążeń wahadłowych, dla współczynnika asymetrii cyklu R = –1. Badania przeprowadzono na 65 próbkach na 7 poziomach odkształcenia: 0,25, 0,35, 0,5, 0,8, 1,0, 1,5 i 2,0%. Częstotliwość obciążenia była taka sama na wszystkich poziomach odkształcenia i wynosiła 0,2 Hz.

Badania polegały na wyznaczeniu trwałości zmęczeniowej próbek przy kontrolowanej wartości odkształcenia. W pierwszej kolejności wyznaczono trwałość próbek normatywnych. Zbudowano wykresy trwałości przedstawione na rysunkach 4 i 5, a następnie na dane wykresy naniesiono punkty odpowiadające trwałości zmęczeniowej próbek o zmniejszonym przekroju poprzecznym – minipróbek.

Do badań wykorzystano standardową maszynę wytrzymałościową INSTRON 8502 z cyfrowym układem sterowania.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

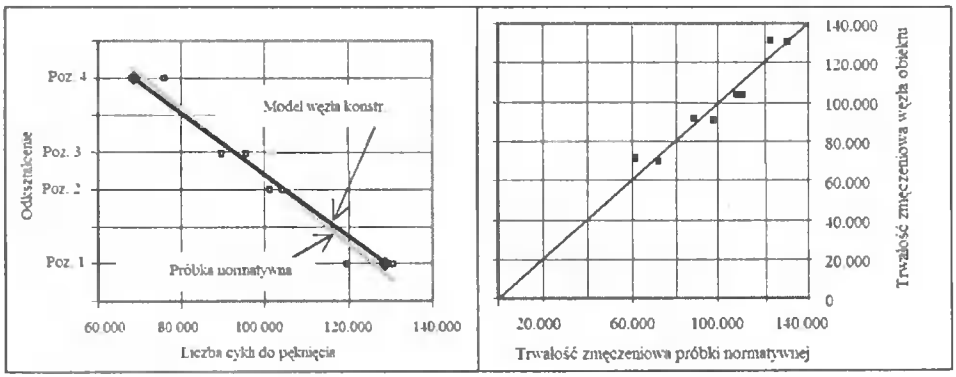
3.1. Badania weryfikacyjne

Celem prowadzonych badań wstępnych było zweryfikowanie możliwości oceny stanu zmęczenia elementów z nieciągłościami geometrycznymi poprzez monitorowanie odkształceń lokalnych w strefie zmęczeniowego pękania elementu konstrukcyjnego i ich równoległe odwzorowanie na próbkach materiałowych. Słuszność przyjętego założenia analizowano poprzez porównanie trwałości zmęczeniowej obiektu poddanego obciążeniu eksploatacyjnemu z trwałością próbki materiałowej poddanej obciążeniu „lokalnemu".

Wyniki tych badań zilustrowane zostały w postaci dwóch wykresów, które umieszczono na rysunku 3. Na rysunku 3a przedstawiono wykres trwałości zmęczeniowej badanych obiektów, na którym przedstawiono dwie linie, określające trwałość zmęczeniową badanych obiektów. Rysunek 3b przedstawia wykres trwałości zmęczeniowej modelowego węzła obiektu technicznego (rys. 2a) i próbki normatywnej (rys. 2b), w postaci punktów. Idealną sytuacją byłaby taka, w której punkty określające trwałość zmęczeniową badanych obiektów układałyby się na wrysowanej linii. Z wykresu powyższego wynika, że różnica trwałości badanych obiektów nie jest znacząca.

Czynnikiem określającym uszkodzenie badanych próbek było pojawienie się pęknięcia zmęczeniowego, a nie całkowite zerwanie badanych elementów.

a) b)

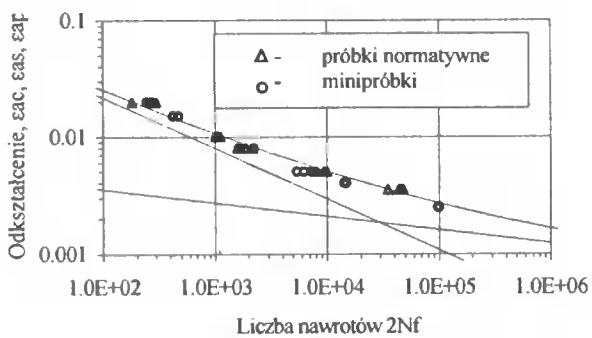


Rys. 3. Wykresy trwałości zmęczeniowej badanych obiektów

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników wstępnych badań weryfikacyjnych prowadzonych na tym etapie można stwierdzić nieistotność różnic trwałości zmęczeniowej elementu konstrukcyjnego i modelowej, jednorodnej próbki materiałowej. Tym samym potwierdzono, że istnieje możliwość zastosowania metod oceny trwałości zmęczeniowej opartych na podejściu lokalnym w ocenie stanu zmęczenia złożonych obiektów.

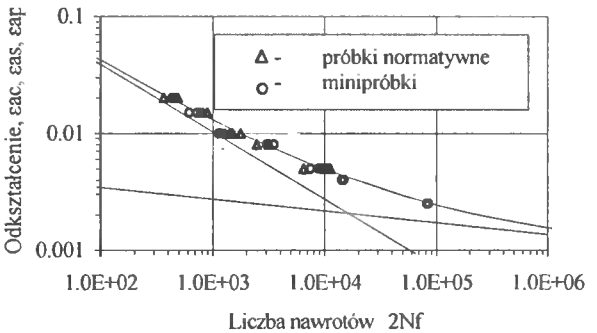
3.2. Badania wpływu wielkości badanych obiektów

Wyniki przeprowadzonych badań zaprezentowano na dwóch wykresach, przedstawionych poniżej. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki trwałości zmęczeniowej próbek wykonanych ze stali 45 (C45).



Rys. 4. Wykres trwałości zmęczeniowej dla stali 45 (C45)

Wyniki trwałości zmęczeniowej próbek wykonanych ze stali 18G2A (S355J2G3) zestawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wykres trwałości zmęczeniowej dla stali 18G2A (S355J2G3)

Do opisu wyników badań zastosowany jest wykres Morrowa (rys. 4, 5), zdefiniowany równaniem (1):

$$\varepsilon = \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^c + \frac{\sigma_f'}{E} \cdot (2N_f)^b \tag{1}$$

gdzie:

- ε – odkształcenia całkowite,
- ε_f' – współczynnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego,
- σ_f' – współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej,
- $2N_f$ – liczba nawrotów obciążenia,
- b i c – wykładniki potęg.

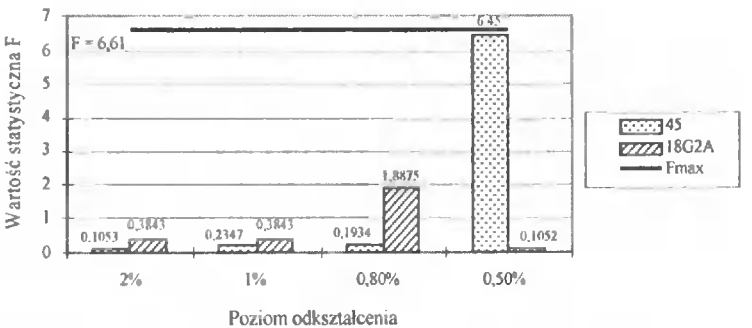
Rozkład punktów na wykresach, dla wszystkich analizowanych przypadków, wskazuje na podobieństwo wartości zmęczeniowej badanych materiałów przy zastosowaniu różnych przekrojów próbki.

Na podstawie uzyskanych wyników badań trwałości zmęczeniowej próbek wykonanych zgodnie z normą do niskocyklowych badań zmęczeniowych i minipróbek w warunkach obciążeń o stałej amplitudzie odkształcenia, wyznaczono średnie wartości trwałości zmęczeniowej dla obu rodzajów próbek.

Dla oceny uzyskanych wyników badań przeprowadzono analizę statystyczną mającą na celu zweryfikowanie hipotezy H_0: o równości średnich wartości trwałości zmęczeniowej na poszczególnych poziomach przyjętego odkształcenia wobec hipotezy H_1: że nie wszystkie średnie badanych populacji są równe.

Hipotezę zweryfikowano wykorzystując test istotności dla wielu średnich [8, 9]. Wymieniony test przeprowadzono biorąc pod uwagę wszystkie uzyskane wyniki trwałości zmęczeniowej dla badanych obiektów, przedstawione na rysunkach 4 i 5.

Z tablicy rozkładu F Snedecora dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0{,}05$ i dla określonych stopni swobody – między grupami $n_1 = 1$ i wewnątrz grup $n_2 = 5$, odczytano krytyczną wartość $F_\alpha = 6{,}61$. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki statystyki F dla poszczególnych poziomów założonego odkształcenia.



Rys. 6. Rozkład zmienności statystyki F Snedecora dla wybranych poziomów odkształcenia

Na podstawie przeprowadzonego testu istotności na poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$, dla stopni swobody $n_1 = 1$ i $n_2 = 5$ nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej H_0 o równości średnich wartości trwałości zmęczeniowej na poszczególnych poziomach przyjętego odkształcenia w warunkach obciążeń o stałej amplitudzie odkształcenia. Oznacza to, że zbiór punktów określających trwałość zmęczeniową minipróbek należy do zbioru punktów określających trwałość zmęczeniową próbek normatywnych.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań wstępnych, prowadzonych w pierwszym etapie, można stwierdzić nieistotność różnic trwałości zmęczeniowej elementu konstrukcyjnego i modelowej, jednorodnej próbki materiałowej. Tym samym potwierdzono, że istnieje możliwość zastosowania metod oceny trwałości zmęczeniowej opartych na podejściu lokalnym w ocenie stanu zmęczenia złożonych obiektów, poprzez zastosowanie minipróbek poddawanych odkształceniom lokalnym występującym w strefach zmęczeniowego pękania diagnozowanych obiektów.

Analiza wartości odkształceń lokalnych wymaga jednak bardzo specyficznych technik pomiarowych. Podstawowym problemem w prowadzonych badaniach jest trudny technicznie pomiar odkształceń w niewielkim obszarze dna karbu.

Uzyskane wyniki badań wpływu wielkości oraz przeprowadzona dla tych wyników analiza statystyczna wykazują, że możliwym jest wykorzystanie próbek o zmniejszonym przekroju poprzecznym w badaniach zmęczeniowych obiektów technicznych.

Wymiary minipróbki zostały tak dobrane, że średnica oraz długość pomiarowa zmniejszone zostały dwukrotnie, co daje czterokrotne zmniejszenie pola przekroju poprzecznego. Jednakże dalsze zmniejszenie przekroju uwidocznić może efekt skali, który opisany jest szczegółowo w wielu pracach naukowych.

W wielu przypadkach trwałość zmęczeniową złożonego obiektu technicznego określa się na podstawie modelowej próbki materiałowej. Jeżeli przyjąć, że zmniejszenie wielkości próbki w stosunku do próbki normatywnej nie ma wpływu na trwałość zmęczeniową, oraz jeżeli określić wielkości minimalizacji próbek tak, aby z jak największą dokładnością odzwierciedlać faktyczny stan uszkodzenia zmęczeniowego materiału, to możliwe jest bazowanie w przypadku metod diagnozowania stanu zmęczenia na próbkach o zmniejszonym przekroju w czasie eksploatacji.

Podejście takie umożliwić może konstruowanie minitesterów zmęczeniowych do oceny stanu uszkodzenia złożonych obiektów technicznych. Efektem tego mogłoby być obniżenie kosztów diagnozowania, ze względu na brak konieczności wyłączania z eksploatacji urządzeń wielkogabarytowych, dla których koszty analizy diagnostycznej są znaczne. Możliwe jest także obniżenie kosztów eksploatacji obiektów poprzez ciągłe monitorowanie stanu uszkodzenia zmęczeniowego próbki, który odzwierciedla stan uszkodzenia zmęczeniowego złożonego obiektu technicznego.

LITERATURA

[1] Suszek J., 2007. Evaluation of scale in fatigue test of constructional elements. 6th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Vrnjačka Banja, Serbia, 141-144.
[2] Szala J., 2002. Przegląd możliwości diagnozowania obiektów technicznych ze względu na zmęczeniowe pękanie. II Seminarium Wibroakustyczna diagnostyka procesów zmęczeniowych, Warszawa, 5-26.
[3] Praca zbiorowa pod redakcją W. Szczepińskiego, 1984. Mechanika techniczna, T. X. Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego. PWN Warszawa.
[4] Katarzyński S., Kocańda S., Zakrzewski M., 1967. Badanie własności mechanicznych metali. WNT Warszawa.
[5] Miklowitz J., 1950. Influence of the dimensional factors on made of yielding and fracture in medium-carbon steel – II. Appl. Mech. 17(2), 159-168.
[6] Suszek J., Boroński D., 2005. Zastosowanie minipróbek w ocenie stanu uszkodzenia zmęczeniowego elementów konstrukcyjnych. Diagnostyka 36, 73-78.
[7] PN-84/H-04334. Badania niskocyklowego zmęczenia metali.
[8] Greń J., 1984. Statystyka matematyczna modele i zadania. PWN Warszawa.
[9] Bendat J., Piersol A., 1976. Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. PWN Warszawa.
[10] Description of a Fighter Aircraft Loading Standard for Fatigue. Evaluation FALSTAFF. ICAF Doc. nr 839. March 1976.

Prowadzone badania wspomagane były finansowo przez KBN w ramach projektu badawczego Nr 4 T07C 020 27, realizowanego w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn UTP w Bydgoszczy oraz EFS i Budżet Państwa w ramach Działania 2.6 Regionalne Strategie Innowacyjne i Transfer Wiedzy – stypendia dla doktorantów.