

Profesor Krzysztof Gołoś  
Politechnika Warszawska

## RECENZJA

dorobku naukowego w postaci jednotematycznego cyklu (8 publikacji i monografii) pt. „Analiza doświadczalna i obliczeniowa trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w warunkach obciążeń losowych ” oraz pozostałego dorobku publikacyjnego - dr inż. Bogdana Ligaja, w związku z otwarciem procedury o nadanie Mu stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn

### 1. Podstawa prawna

Recenzję wykonano na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Techniczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy z dnia 27. 11. 2012 roku.

### 2. Charakterystyka osobowa Kandydata

Dr inż. Bogdan Ligaj jest absolwentem Uniwersytetu Techniczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy W 2000 roku na Wydziale Inżynierii Mechanicznej na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn i specjalności Budowa i Eksploatacja Maszyn i Pojazdów. obronił z wyróżnieniem pracę magisterską pt. „Analiza obciążeń eksploatacyjnych w badaniach zmęczeniowych elementów konstrukcyjnych” napisaną pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Dariusza Borońskiego.

W latach 1999-2000 był zatrudniony jako pracownik naukowo-techniczny, a następnie 2000-2007 od asystent w Katedrze na Podstaw Konstrukcji a Wydziale Mechanicznym Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy . W 2006 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn po obronie pracy doktorskiej pt. „Analiza zastosowania tablic korelacyjnych w badaniach trwałości zmęczeniowej” przygotowanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Józefa Szali. W 2007 roku zatrudniony został na stanowisku adiunkta.

Na dorobek publikacyjny Kandydata składają się 42 publikacje, w tym **31 prac które ukazały się po 2006 roku, tj. po obronie pracy doktorskiej**. Dorobek ten obejmuje :

- 2 monografie ( 1 po doktoracie)
- 7 publikacji w czasopismach z tzw. „listy filadelfijskiej”, kwartalnik-PAN, czasopismo zagraniczne) (5 po doktoracie)
- 11 artykułów w pozostałych czasopismach (11 po doktoracie)
- 4 recenzowane referaty na konferencjach międzynarodowych (4 po doktoracie)
- 18 recenzowanych referatów na konferencjach krajowych (10 po doktoracie).

Za osiągnięcia w pracy naukowej otrzymał: wyróżnienie w ogólnopolskim Konkursie organizowanym przez SIMP na najlepszą pracę dyplomową o charakterze mechanicznym - 2001, nagrodę zespołową I stopnia Rektora Akademii Techniczno-Rolniczej za osiągnięcia w



działalności naukowej - 2002, 2 nagrody zespołowe II stopnia Rektora Akademii Techniczno-Rolniczej w działalności naukowej w 2004 i 2006 roku, list gratulacyjny Dziekana za pracę na rzecz Wydziału Inżynierii Mechanicznej -2011.

### 3. Recenzja jednotematycznego cyklu 9 publikacji

Do oceny przedłożono dziewięć prac naukowych, stanowiących cykl publikacji pod wspólnym tytułem: „**Analiza doświadczalna i obliczeniowa trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w warunkach obciążeń losowych**”, związanych z analizą trwałości zmęczeniowej na drodze obliczeń i programowanych badań zmęczeniowych:

[A1] **Ligaj B.**, Szala G.: Analiza obciążeń w badaniach i obliczeniach trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych – na przykładzie obciążeń eksploatacyjnych samochodu, Logistyka nr 6, 2009. (Punkty MNiSW: 6.) (udział w pracy określono na 50% i dotyczył: sformułowania problemu badań własnych, pomiarów obciążeń eksploatacyjnych, analizy wyników badań oraz opracowanie wniosków.)

[A2] **Ligaj B.**: Wpływ wybranych programów obciążeń wygenerowanych na podstawie tablicy korelacyjnej na trwałość zmęczeniową stali 18G2A, Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe 3/2007 (66), s. 129-146. (Punkty MNiSW: 4.)

[A3] **Ligaj B.**: Selected problems of service load analysis of machine components, Journal of Polish CIMAC, vol.6, no.1, 2011, pp.125-131. (Punkty MNiSW: 9.)

[A4] Szala G., **Ligaj B.**: Kryteria oceny nisko- i wysokocyklowego zmęczenia w obliczeniach trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, Logistyka nr 6, 2009 r. (Punkty MNiSW: 6.) ( udział w pracy określono na 50% i dotyczył: analizy literatury z zakresu tematu pracy, opracowania metodyki i programu badań oraz realizacji badań doświadczalnych.)

[A5] **Ligaj B.**, Szala G.: The comparison of cyclic properties of X5CrNi18-10 steel in the range of low-cycle fatigue in conditions of stress and strain control, Materials Science Forum, Fatigue Failure and Fracture Mechanics vol. 726, 2012 r., pp. 77-83. (Punkty MNiSW: 13.) udział w pracy określono na 60% i dotyczył: sformułowania problemu naukowego pracy, badań własnych, realizacji badań doświadczalnych oraz analizy wyników badań oraz opracowanie wniosków.)

[A6] **Ligaj B.**, Szala G.: Metoda obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych z zastosowaniem dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych, Acta mechanica et automatica, vol. 3, no. 2, Białystok, 2009, s. 47-51. (Punkty MNiSW: 6.) ( udział w pracy określono na 50% i dotyczył: studiów literaturowych z zakresu tematu pracy, sformułowania problemu naukowego pracy, analizy wyników trwałości zmęczeniowej i opracowania wniosków.)

[A7] **Ligaj B.**, Szala G.: Experimental Verification of two-parametric models of fatigue characteristics by using the tests of S355J0 steel as an example, Polish Maritime Research (1/2010), 2010, pp. 39-50. (Punkty MNiSW: 9, IF = 0,114 p.) ( udział w pracy określono na 50% i dotyczył: sformułowania problemu badań własnych, realizacji badań doświadczalnych stali S355J0, współautorstwa w analizie wyników badań oraz opracowaniu wniosków.)

[A8] **Ligaj B.**: Ocena wpływu charakteru obciążenia losowego na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych, Logistyka 6, 2010. (Punkty MNiSW: 6)

[A9] **Ligaj B.**: Analiza doświadczalna i obliczeniowa trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w warunkach losowych obciążeń szerokowidmowych, opracowanie monograficzne, część II zbioru monografii pt.: Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja, Wydawnictwo



Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego, Radom, 2011  
(Punkty MNiSW: 12).

Ocenę podzielono na 2 części:

3.1. Ocena jednotematycznego cyklu 8 publikacji: A1-A8

3.2. Ocena monografii: A9

Zainteresowania naukowe dr Bogdana Ligaja koncentrują się na badaniu zmęczenia materiałów w szczególności na **analizie teoretycznej i doświadczalnej metod wyznaczania trwałości zmęczeniowej metali i ich stopów w warunkach obciążeń losowych.**

### 3.1. Ocena jednotematycznego cyklu 8 publikacji

Z przedstawionego cyklu jednotematycznego cyklu 8 publikacji –A1-A8 (5 współautorskie A1,A3,A4,A5,A7), można wyodrębnić 3 główne problemy (cele) badawcze:

A. *Przeprowadzenie analizy metod schematyzacji losowych obciążeń (metod zliczania cykli) i ich doświadczalna weryfikacja,*

B. *Opracowanie oryginalnych metod wyznaczania programów obciążeń na podstawie widm 2D w postaci tablic korelacyjnych i ich doświadczalna weryfikacja,*

C. *Opracowanie algorytmu obliczeń trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych o szerokim widmie.*

Jest to bardzo szeroki i ważny element analizy zmęczeniowego pęknięcia materiałów i konstrukcji o dużym znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym.

W czasie eksploatacji elementy konstrukcyjne maszyn podlegają obciążeniom losowym. Oceniając trwałość zmęczeniową elementów maszyn należy wziąć pod uwagę charakter wymuszenia obciążenia w zależności czy są to obciążenia dynamiczne, czy też kinematyczne. W konsekwencji następuje zmiana charakteru procesu zmęczenia, która w konsekwencji może prowadzić do uzyskania różnych wyników trwałości [A1,A8]. Jedną z cech charakterystycznych obciążeń jest to, że w ich skład wchodzi cykl z szerokiego zakresu zmienności wartości średnich naprężenia cyklu  $S_m$  i amplitudy cyklu  $S_a$ . Obliczenia i programowane badania trwałości zmęczeniowej wymagają zatem wyznaczenia widm opisujących zmienność w/w parametrów cyklu obciążenia, do których zalicza się tablice korelacyjne w układzie  $S_{min}$ -  $S_{max}$  lub w układzie  $S_a$ - $S_m$  (widma 2D) [A2,A3]. W pracy [A4] przedstawiono analizę obliczeń zmęczeniowych elementów konstrukcyjnych związanych z zakresem nisko-, wysoko- i gigacyklowego zmęczenia. W zakresie wysoko- i gigacyklowego zmęczenia obliczenia prowadzone są w ujęciu naprężeniowym, natomiast w zakresie niskocyklowego zmęczenia w ujęciu odkształceniowym [A5,A6]. Jest to właściwa metodyka postępowania.

Dwuparametrowe widma obciążeń pozwalają podczas obliczeń na uwzględnienie wpływu asymetrii cykli, definiowanej np. za pomocą współczynnika asymetrii cyklu  $R$  na szacowaną trwałość zmęczeniową oraz pozwalają na modelowanie programów obciążeń stosowanych w badaniach doświadczalnych.

Kandydat wybrał jako przykładowe przebieg zmian naprężeń czopa zwrotnicy samochodu osobowego, który został zarejestrowany podczas jazdy na wprost po nawierzchni wykonanej z kostki betonowej. W realizacji obliczeń dokonał transformacji przyjętego przebiegu



naprężeń w zbiór cykli sinusoidalnych z wykorzystaniem znanych metod zliczania cykli tzw. schematyzacji. W pracy przyjęto następujące metody: zliczania lokalnych ekstremów (peak counting method), rozpiętości gałęzi (simple range counting method), par rozpiętości (range-pair counting method) i obwiedni (rain flow counting method). Wyznaczone zbiory danych posłużyły do opracowania widm obciążeń, na podstawie których sporządzono histogramy przedstawiające rozkłady wartości amplitud  $S_{ai}/S_{max}$  i wartości średnich  $S_{mi}/S_{max}$ . Rozkłady wskazują na istotne różnice postaci widm przyjętych przebiegów obciążeń [A1,A2,A3].

Do obliczeń trwałości przyjęto dwuparametrową charakterystykę zmęczeniową opartą na uogólnieniu wykresu Goodmana dla naprężeń granicznych oraz liniową hipotezę sumowania szkód zmęczeniowych Palmgren-Minera.

- **Oryginalnym elementem opracowania jest przedstawienie metod modelowania obciążeń o charakterze pseudolosowym i o częściowej stałości wybranych parametrów cyklu obciążenia na podstawie danych zgromadzonych w tablicy. Wykorzystując opracowane widmo obciążenia przedstawiono przykłady programów obciążeń o charakterze pseudolosowym oraz z częściową stałością wartości: średnich, amplitud, minimów i maksimów [A6].**

Przeprowadzone obliczenia dla widm obciążeń opracowanych według przyjętych metod schematyzacji pozwoliły walidacje proponowanych metod - na przedstawienie wyników obliczeń na tle wyników badań doświadczalnych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych. Obliczenia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w warunkach losowych obciążeń szeroko-widmowych związane są z zastosowaniem takich charakterystyk zmęczeniowych oraz widm obciążeń, które uwzględniają wpływ cykli z szerokiego zakresu zmienności współczynnika asymetrii cyklu R.

- **W tym celu Kandydat opracował algorytmu obliczeniowy [A7] oparty na zastosowaniu dwuparametrowej charakterystyki zmęczeniowej oraz przeprowadził doświadczalną weryfikację wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej.**

Kandydat wykonał też liczne badania doświadczalne dla stali 18G2A, S355J0 [A8], stopu aluminium D16 oraz wykorzystał w analizach obszerne dane doświadczalne z literatury. Analiza porównawcza wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych wskazała istotny wpływ metody schematyzacji na trwałość zmęczeniową.

- **Do oryginalnych osiągnięć naukowych Kandydata w tym zakresie należy eksperymentalna weryfikacja wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń eksploatacyjnych o szerokim widmie, prowadzonych na podstawie widm obciążeń wyznaczonych powszechnie znanymi i zalecanymi metodami zliczania cykli.**

Należy także podkreślić zastosowanie w obliczeniach dwuparametrowej charakterystyki zmęczeniowej pozwalającej na uwzględnienie wpływu cykli obciążenia o współczynniku asymetrii cyklu R z zakresu  $(-\infty) < R < (1,0)$  na trwałość zmęczeniową.

Analiza porównawcza dla badanych wymuszeń i materiałów wykazała dużą zgodność wyników badań programowanych z wynikami badań zmęczeniowych w warunkach obciążeń losowych w dużym zakresie zmienności szerokości widma. Omawiane badania wykazały ponadto dużą przydatność widma obciążeń w postaci tablicy korelacyjnej w analizie charakteru eksploatacyjnych obciążeń. Algorytm obliczeń trwałości zmęczeniowej, poza możliwością oceny trwałości zmęczeniowej metali i ich stopów, może mieć praktyczne zastosowanie w badaniach symulacyjnych, szczególnie przydatny w początkowych fazach procesu projektowo-konstrukcyjnego, w których brak jest materialnych obiektów do badań. Wskazana jest dalsza kontynuacja prac w tym zakresie, w celu dodatkowej weryfikacji przedstawionej metodyki. Ważkim tematem do ewentualnych przyszłych rozważań jest analiza losowych wymuszeń wieloosiowych 3D i ich wpływu na trwałość zmęczeniową.



**Przedstawiona metodyka analizy widma w warunkach obciążeń losowych i zaproponowany algorytm oceny trwałości zmęczeniowej stanowi rozszerzenie stosowanych analiz i powinien służyć do poprawy procesu antyzmęczeniowego projektowania elementów konstrukcyjnych.**

### **3.2. Ocena monografii**

[A9] Ligaj B.: *Analiza doświadczalna i obliczeniowa trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w warunkach losowych obciążeń szerokowidmowych, opracowanie monograficzne, część II* zbioru monografii pt.: Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego, Radom, 2011 r.

Monografia liczy 228 stron, 82 pozycje literatury. Monografia składa się z 7 rozdziałów i spisu literatury. Monografia jest wynikiem realizacji projektu badawczego własnego nr 0715/B/T02/2008 pt.: Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja. /2008 – 2011/.

Monografia koncentruje się na problematyce opracowania widm dla obciążeń losowych (eksploatacyjnych) w postaci tablic korelacyjnych i dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych według wybranych modeli matematycznych oraz doświadczalnej a weryfikacji wyników obliczeń zmęczeniowych.

Poszczególne cele badawcze wyodrębnione w monografii:

1. analiza stanu wiedzy z zakresu metod obliczeń zmęczeniowych,
2. opracowanie algorytmu obliczeń trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych o szerokim widmie,
3. analiza obciążeń eksploatacyjnych - opracowanie widma obciążenia 2D,
4. analiza trwałości zmęczeniowej dla wybranych stali konstrukcyjnych,
5. przeprowadzenie programowanych badań trwałości zmęczeniowej,
6. walidacja doświadczalna zaproponowanego algorytmu
7. sformułowania wniosków: poznawczych i aplikacyjnych.

Cele i zadania badawcze przedstawione w pracy są ważne zarówno z naukowego i praktycznego punktu widzenia.

**Postawione cele pracy zostały zrealizowane**, a zaproponowane metody badawcze i uzyskane wyniki zostały przedstawione w kolejnych rozdziałach monografii

Monografia stanowi syntezę dorobku publikacyjnego Kandydata w zakresie badań i obliczeń trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych. Problematyka badań i obliczeń omówiona w monografii uległa istotnemu poszerzeniu, przede wszystkim **w zakresie ilości gatunków stali przyjętych do badań i obliczeń /stale S355J0, C45 i 41Cr4/**. W zakresie obciążenia przyjęto obciążenie losowe o szerokim widmie, które stanowi ogólny przypadek obciążeń eksploatacyjnych elementów konstrukcyjnych. Monografię kończą wnioski i wytyczne. Na ich podstawie sformułowano zalecenie stosowania w obliczeniach wstępnych trwałości zmęczeniowej elementów maszyn

Podstawowym osiągnięciem naukowym monografii jest:

a) **opracowanie autorskiej koncepcji programowanych badań zmęczeniowych, polegającej na metodzie losowego pobierania cykli z widma obciążenia 2D (tablicy korelacyjnej) prowadzącego do opracowania programu obciążeń o charakterze pseudolosowym.**



b) w zakresie obliczeń trwałości zmęczeniowej, oryginalny algorytm obliczeń oparty na zastosowaniu widma obciążeń 2D i dwuparametrowej charakterystyki zmęczeniowej 2D,

c) poszerzenie bazy danych materiałowych dla stali S355J0, C45 i 41Cr4.

#### 4. Ocena pozostałego dorobku publikacyjnego

Poza głównym nurtem zainteresowań naukowych Kandydata przedstawionych w jednotematycznym cyklu publikacji (p.3) dotyczącym analizy doświadczalnej i obliczeniowej trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w warunkach obciążeń losowych, działalność naukowa dr inż. Bogdana Ligaja obejmowała szereg zadań pokrewnych, rozszerzających zakres Jego badań. W szczególności:

1. Zagadnienia metodyczne programowanych badań zmęczeniowych w tym: pomiary i analiza obciążeń eksploatacyjnych, metody schematyzacji (metody zliczania cykli) obciążeń eksploatacyjnych, metody opracowania widm i programów obciążeń,
2. Metody analiz trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.
3. Badania i modelowanie właściwości mechanicznych materiałów, szczególnie właściwości cyklicznych metali i ich stopów oraz trwałości zmęczeniowej.
5. Problematyka robotyki i mechatroniki.

**Podsumowując dorobek publikacyjny Kandydata obejmuje łącznie 57 publikacji, w tym 41 prac które ukazały się od 2003 roku, tj. po obronie pracy doktorskiej.**

Na dorobek ten składają się:

- 2 monografie ( 1 po doktoracie) ,
- 7 publikacji w czasopismach z tzw. „listy filadelfijskiej”, kwartalnik-PAN, czasopismo zagraniczne (5 po doktoracie) Materials Science Forum - Fatigue Failure and Fracture Mechanics (Punkty MNiSW: 13.), Journal of Polish CIMAC (Punkty MNiSW: 9, obecnie 6), Polish Maritime Research (Punkty MNiSW: 9, obecnie 20, IF: 0,114 p.), /\*punktacja MNiSW podlega okresowym modyfikacjom/
- 11 artykułów w pozostałych czasopismach (11 po doktoracie): Logistyka (Punkty MNiSW: 6, obecnie 4), Acta mechanica et automatica (Punkty MNiSW: 6, obecnie 5.) Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe(Punkty MNiSW: 4) /\*punktacja MNiSW podlega okresowym modyfikacjom/
- 4 recenzowane referaty na konferencjach międzynarodowych (4 po doktoracie)
- 18 recenzowanych referatów na konferencjach krajowych (10 po doktoracie).

Są to cenione czasopisma z zakresu zmęczeniowego pękania.

Należy zaznaczyć, w dorobku publikacyjnym Kandydata jest relatywnie duża liczba artykułów współautorskich. Z przedstawionego zestawu jednotematycznego 8 publikacji –A1-A8 (5 to współautorskie A1,A3,A4,A5,A7). Z przedstawionego całego zestawu artykułów po doktoracie -16 prac (9 jest współautorskich). Udział Kandydata jest podany w ujęciu procentowym i merytorycznym, umożliwiającym określenie Jego udziału. Jednocześnie bardzo cennym uzupełnieniem jest publikacja A9 - obszerna monografia Kandydata, stanowiąca syntezę dorobku publikacyjnego, jednoznacznie przedstawiająca Jego osiągnięcia naukowe.



Jest to znaczący dorobek naukowy umożliwiający uznać dr inż. Bogdana Ligaja za uznanego pracownika naukowego, w zakresie zmęczeniowego pękania.

#### 5. Wniosek końcowy

Na podstawie podanych w opinii ocen dorobku naukowego dr inż. Bogdana Ligaja w postaci jednotematycznego cyklu (8 publikacji i monografii) pt. „Analiza doświadczalna i obliczeniowa trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w warunkach obciążeń losowych” oraz pozostałego dorobku publikacyjnego, stwierdzam, że Kandydat posiada dobre kwalifikacje naukowe do prowadzenia samodzielnie złożonych prac naukowo-badawczych. Jego dorobek naukowy spełnia wymogi Ustawy o stopniach i tytułach naukowych.

**Dorobek ten może stanowić podstawę do nadania Mu stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.**

*K. Gotwałd*