

## AUTOREFERAT

### 1. Dane osobowe

Imię i nazwisko: **Bogdan Ligaj**

### 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- Stopień doktora      Rok uzyskania: **2006**  
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny  
(obecnie: Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy,  
Wydział Inżynierii Mechanicznej)  
Dyscyplina naukowa: Budowa i Eksploatacja Maszyn  
Tytuł pracy doktorskiej: **Analiza zastosowania tablic korelacyjnych  
w badaniach trwałości zmęczeniowej**
- Promotor:      prof. dr hab. inż. Józef Szala  
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy
- Recenzenci:  
dr hab. inż. Jan Sikora, prof. nadzw. PG  
Politechnika Gdańska
- prof. dr hab. inż. Janusz Sempruch  
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy
- Tytuł magistra      Rok uzyskania: **2000**  
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy), Wydział Mechaniczny  
(obecnie: Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy,  
Wydział Inżynierii Mechanicznej)  
Kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn  
Tytuł pracy magisterskiej: **Analiza obciążeń eksploatacyjnych w  
badaniach zmęczeniowych elementów konstrukcyjnych.**  
Promotor: dr inż. Dariusz Boroński
- Tytuł inżyniera      Rok uzyskania: **1999**  
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny  
(obecnie: Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy,  
Wydział Inżynierii Mechanicznej)  
Kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn  
Tytuł pracy inżynierskiej: **Projekt układu napędowego siłowni  
wiatrowej.**  
Promotor: Prof. dr hab. inż. Józef Szala

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 1999-2000** Pracownik naukowo-techniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy.
- 2000-2007** Asystent, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy.
- 2007-obecnie** Adiunkt, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy – obecnie Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.

### 4. Wskazane osiągnięcia wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

- 4.1. Jednotematyczny cykl publikacji pt.: „*Analiza doświadczalna i obliczeniowa trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w warunkach obciążeń losowych*”, stanowiący osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora.

[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.) (Mój 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.) (Mój 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.) (*Mój 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.) (*Mój 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.) (*Mój 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 r. (Punkty MNiSW: 12.)

#### **4.2. Omówienie celu naukowego poszczególnych prac oraz osiągniętych wyników**

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.

Ocena trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych maszyn poddanych w warunkach eksploatacji obciążeniom losowym związana jest z szeregiem szczegółowych zagadnień z zakresu opracowywania widm i programów obciążeń, opisu własności

zmęczeniowych tworzyw konstrukcyjnych, czy też hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

Analiza danych literaturowych i własne badania obciążeń losowych wskazują, że w czasie eksploatacji elementy konstrukcyjne maszyn podlegają obciążeniom losowym zaliczanym do grupy obciążeń o szerokim widmie. Jedną z cech charakterystycznych tego typu obciążeń jest to, że w ich skład wchodzi cykl z szerokiego zakresu zmienności wartości średnich  $S_m$  i amplitud  $S_a$ . Obliczenia i programowane badania trwałości zmęczeniowej wiążą się z wyznaczeniem widm opisujących zmienność parametrów cyklu obciążenia, do których zalicza się tablice korelacyjne w układzie  $S_{\min}$ - $S_{\max}$  lub w układzie  $S_a$ - $S_m$  (widma 2D). Dwuparametryczne widma obciążeń pozwalają podczas obliczeń na uwzględnienie wpływu cykli, o różnej wartości współczynnika asymetrii cyklu  $R$ , na szacowaną trwałość zmęczeniową oraz pozwalają na modelowanie programów obciążeń stosowanych w badaniach doświadczalnych.

**Celem naukowym jednolitego cyklu publikacji jest analiza teoretyczna i doświadczalna metod wyznaczania trwałości zmęczeniowej metali i ich stopów w warunkach obciążeń losowych.**

**Realizacja ogólnego celu wymagała rozwiązania szeregu szczegółowych zagadnień, których celem była:**

- **analiza metod schematyzacji losowych obciążeń (metod zliczania cykli) i ich doświadczalna weryfikacja,**
- **opracowanie oryginalnych metod wyznaczania programów obciążeń na podstawie widm 2D w postaci tablic korelacyjnych i ich doświadczalna weryfikacja,**
- **opracowanie algorytmu obliczeń trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych o szerokim widmie.**

W obliczeniach trwałości zmęczeniowej zastosowano opis własności cyklicznych metali w postaci dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych oraz liniową hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

Badania doświadczalne przeprowadzono metodą programowanych badań zmęczeniowych.

**Osiągnięcie wymienionych celów naukowych ma istotne znaczenie praktyczne, polegające na bezpośrednim zastosowaniu opracowanych metod obliczeniowych, według opisanego w publikacjach algorytmu oraz metod programowanych badań, w ocenie trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych.**

Realizacja postawionych celów znajduje odbicie w uzyskanych wynikach, które zostały przedstawione w pracach poniżej.

[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) *(Mój udział w pracy określono na 50% i dotyczył: sformułowania problemu badań własnych, pomiarów obciążeń eksploatacyjnych, analizy wyników badań oraz opracowanie wniosków.)*

W artykule zostały przedstawione zagadnienia dotyczące obliczeń trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń eksploatacyjnych z zastosowaniem dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej i liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

*Celem pracy było porównanie wyników trwałości zmęczeniowej uzyskanych w wyniku obliczeń dla modeli obciążenia opracowanych z zastosowaniem różnych metod schematyzacji wybranego przebiegu eksploatacyjnego.*

Do obliczeń trwałości zmęczeniowej przyjęto przebieg zmian naprężeń czopa zwrotnicy samochodu osobowego, który został zarejestrowany podczas jazdy na wprost po nawierzchni wykonanej z kostki betonowej. Następnie został on poddany ocenie statystycznej celem określenia wartości składowej statycznej i dynamicznej obciążenia oraz zgodności danych z rozkładem normalnym. Kolejnym krokiem w realizacji obliczeń była transformacja 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  $S_{mi}/S_{max}$ .

Do obliczeń trwałości przyjęto dwuparametryczną charakterystykę zmęczeniową opartą na uogólnieniu wykresu Goodmana dla naprężeń granicznych (model II) oraz liniową

hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrena-Minera. Przeprowadzone obliczenia dla widm obciążeń opracowanych według przyjętych metod schematyzacji pozwoliły na przedstawienie wyników obliczeń na tle wyników badań doświadczalnych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych.

Analiza porównawcza wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych wskazała istotny wpływ metody schematyzacji na trwałość zmęczeniową. W zakresie naprężeń od 350 do 450 MPa dla metody zliczania rozpiętości gałęzi (simple range counting method) oraz w zakresie naprężeń od 450 do 550 MPa dla metod par rozpiętości (range-pair counting method) i obwiedni (rainflow counting method) uzyskano najwyższą zgodność wyników obliczeń i badań. Wyniki trwałości zmęczeniowej dla metod par rozpiętości (range-pair counting method) i obwiedni (rain flow counting method) mieszczą się w obszarze bezpiecznym w zakresie naprężeń od 350 MPa do 500 MPa, który to obszar wyznaczony został wykresem trwałości zmęczeniowej dla obciążeń eksploatacyjnych. W przypadku metody zliczania lokalnych ekstremów, tak jak się spodziewano, uzyskano najniższą trwałość. Duża zgodność wyników dla metody schematyzacji, par rozpiętości i obwiedni, jest spowodowana podobnym sposobem ich działania, prowadzącym do wyznaczenia zbiorów cykli różniących się w sposób nieistotny (co zostało udokumentowane w pracy).

Do oryginalnych osiągnięć naukowych pracy 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. W konkluzji sformułowane jest zalecenie dotyczące stosowania określonych metod schematyzacji w kontekście opracowywania przebiegów obciążeń o szerokim widmie. Należy także podkreślić zastosowanie w obliczeniach dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej pozwalającej na uwzględnienie wpływu cykli obciążenia o współczynniku asymetrii cyklu z zakresu  $(-\infty) < R < (1,0)$  na trwałość zmęczeniową.

[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)

Jednym z elementów oceny trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych są programowane badania trwałości zmęczeniowej realizowane na stanowiskach badawczych.

Ważnym elementem tych badań jest zakres działań związany z przygotowaniem programów obciążeń.

*W omawianej pracy podstawowym celem było przedstawienie możliwości modelowania obciążeń o zmiennych parametrach cyklu obciążenia na podstawie danych zgromadzonych w tablicy korelacyjnej w układzie  $S_{min}$ - $S_{max}$ .*

Badania oparto na obciążeniu eksploatacyjnym zwrotnicy koła samochodu osobowego, który został poddany tzw. schematyzacji metodą obwiedni (rain flow counting method). Opracowany zbiór cykli i półcykli sinusoidalnych stanowił podstawę do opracowania widma obciążenia w postaci tablicy korelacyjnej w układzie  $S_{min}$ - $S_{max}$  (widmo 2D).

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. Pobieżna analiza opracowanych przykładów nasunęła pytanie: czy badania doświadczalne w warunkach obciążeń programowanych (z zastosowaniem opracowanych programów obciążeń) będą zgodne z wynikami badań w warunkach obciążeń eksploatacyjnych, na podstawie których opracowano widmo obciążenia wykorzystane w modelowaniu?

Szukając odpowiedzi na postawione pytanie przeprowadzono badania doświadczalne na próbkach normatywnych wykonanych ze stali 18G2A w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programowanych. Użyte programy zostały opracowane według sposobu pobierania: pseudolosowego, z częściową stałością wartości średniej zmiennej rosnąco i z częściową stałością wartości średniej zmiennej malejąco. Analiza statystyczna wyników badań wykazała, iż różnice w wynikach trwałości zmęczeniowej uzyskanych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programowanych są nieistotne. Świadczy to o braku istotnego wpływu sekwencji cykli w programie obciążenia na trwałość zmęczeniową.

Powyższe stwierdzenie ma bardzo ważne znaczenie ze względu na możliwość zastąpienia w warunkach laboratoryjnych losowego obciążenia eksploatacyjnego obciążeniem programowanym o określonej sekwencji cykli, opracowanym na podstawie tablicy korelacyjnej.

---

[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.)

Obliczenia i badania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych maszyn prototypowych wymagają przyjęcia standaryzowanych widma obciążeń wyznaczonych dla podobnej klasy obiektów (ze względu na brak danych) oraz założenia czasu eksploatacji.

*Celem pracy jest sformułowanie wytycznych dotyczących analizy obciążeń eksploatacyjnych elementów maszyn w kontekście prowadzonych badań i obliczeń trwałości zmęczeniowej obejmujących: ocenę zakresów nisko-, wysoko- i gigacyklowego zmęczenia, oceny rodzaju obciążenia ze względu na charakter wymuszenia oraz oceny projektowanej trwałości zmęczeniowej przykładowych elementów konstrukcyjnych.*

Przyjęcie na etapie projektowania trwałości wyrażonej liczbą cykli obciążenia dla elementu konstrukcyjnego, pozwala na określenie charakteru przewidywanych zjawisk zmęczeniowych oraz poziomu naprężeń maksymalnych. Taka wiedza umożliwia właściwy dobór metod obliczeniowych oraz programu badań doświadczalnych.

Oceniając trwałość zmęczeniową elementów maszyn należy wziąć pod uwagę charakter wymuszenia obciążenia. W zależności czy są to obciążenia dynamiczne, czy też kinematyczne następuje zmiana charakteru procesu zmęczenia, która w konsekwencji może prowadzić do uzyskania różnych wyników trwałości.

Przeprowadzona analiza trwałości eksploatacyjnej, wybranych elementów konstrukcyjnych maszyn, wskazuje, że zakładana trwałość wyrażona liczbą cykli zmian obciążeń mieści się w zakresie wysoko- i gigacyklowego zmęczenia. Wymienione zakresy można uznać za dominujące w projektowaniu elementów konstrukcyjnych maszyn ze względu na trwałość zmęczeniową. Dlatego należy rozwijać metody obliczeniowe i badawcze odpowiadające wyżej wymienionym zakresom zmęczenia.

[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.) *(Mój udział w pracy określono na 50% i dotyczył: analizy literatury z zakresu tematu pracy, opracowania metodyki i programu badań oraz realizacji badań doświadczalnych.)*

Realizacja obliczeń zmęczeniowych elementów konstrukcyjnych w fazie do inicjacji makropęknięć zmęczeniowych wymaga przyjęcia odpowiednich metod szacowania trwałości, 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.

*Na tym tle określono cel pracy, którym jest analiza kryteriów oceny zakresów: niskocyklowego zmęczenia, wysokocyklowego zmęczenia oraz gigacyklowego zmęczenia.*

Znane z literatury kryteria oceny zakresów nisko- i wysokocyklowego zmęczenia zostały poddane analizie w odniesieniu do następujących materiałów: stali C45 (zalicza się go grupy materiałów cyklicznie osłabiająco-umacniających się), stal 18G2A (materiał podlegający cyklicznemu osłabieniu) oraz stop aluminium 2024 T3 (stop cyklicznie umacniający się). W pracy zostały przedstawione oryginalne wyniki badań doświadczalnych realizowane w warunkach obciążeń statycznych i cyklicznych ( $R = -1$ ), na tle których sformułowano wnioski.

W pracy wykazano, że powszechne przyjmowanie w literaturze i procedurach obliczeniowych (np. FITNET) granicy plastyczności, jako kryterium przejścia z zakresu niskocyklowego zmęczenia do zakresu wysokocyklowego zmęczenia, jest nieprecyzyjne. Wynika to z faktu, że granica plastyczności wyznaczona jest w warunkach obciążenia monotonicznego, co nie odpowiada warunkom obciążenia cyklicznego.

Właściwym kryterium są: dynamiczna granica plastyczności wyznaczona z wykresu Ramberga-Osgooda oraz trwałość zmęczeniowa odpowiadająca liczbie cykli wyznaczonej punktem przecięcia linii opisujących zmianę wartości odkształceń plastycznych i odkształceń sprężystych, wyznaczona z wykresu Mansona-Coffina.

[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.) *(Mój udział w pracy określono na 60% i dotyczył: sformułowania problemu naukowego pracy, badań własnych, realizacji badań doświadczalnych oraz analizy wyników badań oraz opracowanie wniosków.)*

W świetle przedstawionych w pracy zagadnień związanych ze sposobem wymuszeń obciążeń (naprężeniowego i odkształceniowego) sformułowano następującą hipotezę:

*w zależności od charakteru zmiennego obciążenia elementu konstrukcyjnego należy dobierać metody wyznaczania własności cyklicznych metali (dla obciążenia dynamicznego w ujęciu naprężeniowym, a dla obciążenia kinematycznego w ujęciu odkształceniowym).*

Weryfikację postawionej hipotezy przeprowadzono na podstawie wyników badań stali X5CrNi18-10 (1.4301) uzyskanych w warunkach sterowania zakresem naprężenia i odkształcenia. Analiza porównawcza wykresów: cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda, trwałości zmęczeniowej Mansona-Coffina oraz trwałości zmęczeniowej Wöhlera wyznaczonych w wymienionych warunkach sterowania wykazała istotne różnice. Wartość różnic związana jest z wartością amplitud naprężenia  $S_a$  lub amplitudą odkształcenia całkowitego  $\varepsilon_{ac}$ , co wskazuje na konieczność świadomego wyboru metody badawczej właściwej dla warunków obciążenia eksploatacyjnego elementu konstrukcyjnego.

Stosowanie w obliczeniach trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych wykresów Mansona-Coffina i Wöhlera powinno być związane z analizą warunków wymuszenia obciążenia. Występujące różnice pomiędzy wymienionymi wykresami mogą prowadzić do istotnych różnic w obliczeniach trwałości zmęczeniowej wynikających z wielokrotnego sumowania błędów w zakresie oszacowań trwałości od  $10^6$  do  $10^8$  cykli. Sformułowany wniosek jest praktycznym zaleceniem wynikającym z realizacji badań.

[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.) (Mój 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.)

Obliczenia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w warunkach losowych obciążeń szerokowidmowych związane są z zastosowaniem takich charakterystyk zmęczeniowych oraz widm obciążeń, które uwzględniają wpływ cykli z szerokiego zakresu zmienności współczynnika asymetrii cyklu R. Na tym tle sformułowano cel pracy, którym jest:

*opracowanie algorytmu obliczeniowego opartego na zastosowaniu dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej oraz doświadczalna weryfikacja wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej elementu konstrukcyjnego.*

Realizacja celu pracy została oparta na oryginalnym algorytmie obliczeń bazującym na zastosowaniu dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej oraz dwuparametrycznym modelu obciążenia eksploatacyjnego w postaci tablicy korelacyjnej do obliczeń trwałości zmęczeniowej.

Metoda obliczeń według opracowanego algorytmu została zobrazowana przykładem, który dotyczył analizy trwałości elementu konstrukcyjnego w postaci płaskownika usztywnionego za pomocą kątownika wykonanego ze stopu aluminium D16CzATW. W obliczeniach przyjęto, dwuparametryczną charakterystykę zmęczeniową (model II), standaryzowany przebieg obciążeń Falstaff nr 130 oraz hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren-Minera. Na potrzeby realizacji obliczeń przebieg obciążeń został poddany schematyzacji metodą obwiedni (rain flow counting method), co pozwoliło na opracowanie modelu obciążenia w postaci tablicy korelacyjnej w układzie  $S_{\min}$ - $S_{\max}$ . Niezbędne dane do opisu dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej zostały wyznaczone w badaniach doświadczalnych stopu D16CzATW.

Wyniki obliczeń przedstawiono na tle wyników badań doświadczalnych elementu konstrukcyjnego w warunkach obciążeń eksploatacyjnych (przebieg Falstaff nr 130). Analiza przedstawionych wyników pozwala stwierdzić dobrą zgodność wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych.

Przedstawiony algorytm rekomenduje się do stosowania w obliczeniach trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych.

[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.) (*Mój 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.*)

Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe opisują własności zmęczeniowe materiału w zakresie szerokiej zmienności współczynnika asymetrii cyklu  $R$  ( $-\infty < R < 1.0$ ). W pracy zostały przedstawione wybrane charakterystyki stosowane w obliczeniach trwałości zmęczeniowej wraz z ich szczegółowym opisem.

*Celem omawianej pracy była weryfikacja doświadczalna wybranych dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych na podstawie wyników badań próbek ze stali S355J0.*

Badania doświadczalne przeprowadzono na normatywnych próbkach materiałowych wykonanych ze stali S355J0 w warunkach obciążeń sinusoidalnych stałoamplitudowych charakteryzujących się różną wartością współczynnika asymetrii cyklu  $R$ . Eksperyment

zrealizowano dla następujących współczynników R: 0, -0.5, -1.0, -1.25 oraz -2.0. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów trwałości zmęczeniowej  $N(S_a)_R$ , a na ich podstawie sporządzono doświadczalną charakterystykę zmęczeniową  $N(S_a, S_m)$ .

Osiągnięciem pracy jest weryfikacja doświadczalna dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych według następujących modeli: Heywooda, model I (według J. Szali oparty na koncepcji Haigha), model II (według J. Szali oparty na koncepcji Goodmana), model III (według A. Lipskiego oparty na założeniach Gerbera), model IV (według A. Lipskiego oparty na równaniu elipsy) i model V (według A. Lipskiego oparty na założeniu parabolicznej postaci linii stałych trwałości). Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na sformułowanie szeregu wniosków. Najważniejsze wskazują na to, że:

- a) przyjęty model opisu dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej w sposób istotny wpływa na zgodność wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych,
- b) najwyższą zgodność wyników uzyskano dla modeli: I, III, IV, w całym zakresie prowadzonej analizy,
- c) w obliczeniach wstępnych np. w procesie projektowo-konstrukcyjnym, w którym brak dokładnych danych o własnościach cyklicznych materiału i o obciążeniach eksploatacyjnych, zaleca się stosować proste modele I i II.

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

Elementy konstrukcyjne maszyn w warunkach eksploatacji poddawane są obciążeniom zmiennym o charakterze losowym. Wpływ wymienionych obciążeń na trwałość zmęczeniową elementów zależy m.in. od szerokości widma obciążenia.

*Przedmiotem niniejszej pracy była ocena wpływu charakteru obciążenia losowego na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej.*

Na potrzeby pracy przyjęto cztery przebiegi zmian naprężeń pochodzące z oryginalnych pomiarów naprężeń czopa zwrotnicy samochodu osobowego, wykonanych w różnych warunkach drogowych związanych z jazdą po różnej nawierzchni oraz podczas wykonywania określonych manewrów. Przyjęte przebiegi poddano ocenie ze względu na szerokość widma obciążenia. Szerokość widma oceniono stosując uproszczoną metodę bazującą na wartości

współczynnika I obliczanego, jako stosunek liczby przecięć poziomu wartości średniej do liczby lokalnych ekstremów. Wyznaczone wartości wymienionego współczynnika wykazały istotne różnice, co świadczy o zróżnicowanym charakterze przyjętych obciążeń i pozwala zakwalifikować je do grupy obciążeń o szerokim widmie. Następnie przebiegi obciążeń poddano schematyzacji metodą pełnych cykli (*full cycles counting method*), co pozwoliło na wyznaczenie widm obciążeń przedstawionych w postaci histogramów względnych wartości amplitud  $S_{ai}/S_{max}$  i względnych wartości średnich  $S_{mi}/S_{max}$ . Rozkłady wskazują na istotne różnice postaci widm przyjętych przebiegów obciążeń.

Obliczenia trwałości zmęczeniowej w wymienionych warunkach obciążeń eksploatacyjnych przeprowadzono z zastosowaniem dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej model II (uogólniony wykres Goodmana), opisującej własności zmęczeniowe stali 18G2A w szerokim zakresie zmienności współczynnika asymetrii cyklu  $R$  ( $-\infty < R < 1.0$ ). Niezbędne dane, potrzebne do opisu dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej, zostały wyznaczone z badań doświadczalnych w warunkach obciążeń statycznych i cyklicznych, na próbkach wykonanych według odpowiednich (dla danego typu badań) norm. W obliczeniach zastosowano hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren-Minera zmodyfikowanej tak, aby pozwalała na sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych spowodowanych cyklami o zmiennej wartości  $S_a$  i  $S_m$ .

Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresów Gassnera w układzie  $S_{max}$ - $N$ . Analiza wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej wskazała różnice pomiędzy wartościami trwałości dla poszczególnych przebiegów obciążeń eksploatacyjnych w zależności od przyjętego poziomu naprężeń maksymalnych  $S_{max}$ .

Na podstawie wyników obliczeń trwałości z zakresu nisko- i wysokocykowego zmęczenia można uznać, że identyfikacja szerokości widma obciążenia za pomocą współczynnika I jest skuteczna. Na tej podstawie rekomenduje się jego stosowanie do oceny obciążeń eksploatacyjnych.

[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. (Punkty MNiSW: 12.)

Monografia stanowi syntezę dorobku publikacyjnego 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. W zakresie obciążenia przyjęto obciążenie losowe o szerokim widmie, które stanowi ogólny przypadek obciążeń eksploatacyjnych elementów konstrukcyjnych.

*Celem monografii jest opracowanie metody programowanych badań trwałości zmęczeniowej, algorytmu i programu obliczeń trwałości zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w warunkach obciążeń losowych o szerokim widmie, z zastosowaniem widm obciążeń w postaci tablic korelacyjnych i dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych według wybranych modeli matematycznych oraz doświadczalna weryfikacja wyników obliczeń zmęczeniowych.*

Realizacja postawionego celu pracy wymagała wykonania następujących zadań:

- a) analizy stanu wiedzy z zakresu metod obliczeń zmęczeniowych,
- b) opracowania algorytmu obliczeń trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych o szerokim widmie,
- c) analizy obciążeń eksploatacyjnych prowadzącej do opracowania widma obciążenia 2D,
- d) obliczenia trwałości zmęczeniowej dla wybranych stali konstrukcyjnych,
- e) realizacji programowanych badań trwałości zmęczeniowej,
- f) analizy porównawczej wyników obliczeń i badań doświadczalnych,
- g) sformułowania wniosków: poznawczych i utylitrnych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników obliczeń i badań doświadczalnych dla trzech gatunków stali S355J0, C45 i 41Cr4 opracowano wnioski. Na ich podstawie sformułowano zalecenie stosowania w obliczeniach wstępnych trwałości zmęczeniowej elementów maszyn dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych oznaczonych jako modele IM i II.

Ważnym elementem pracy jest oryginalny algorytm obliczeń trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych, w którym wybór ścieżki obliczeń oparto na kryterium

związanym z szerokością widma obciążenia. Kryterium tym jest współczynnik I, którego wartość ustala się na podstawie prostych analiz przebiegu zmian obciążenia.

Osiągnięciem monografii jest 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. W pracy wykazano skuteczność takiego programu obciążeń uzyskując pseudolosowy przebieg naprężeń równoważny obciążeniu losowemu pod względem rozkładu lokalnych ekstremów i ze względu na zgodność wyników badań.

Przedstawiony algorytm obliczeń trwałości zmęczeniowej dotyczy ujęcia naprężeniowego, który może być stosowany w obliczeniach dla zakresu wysokocyklowego zmęczenia. Przyjęcie współczynnika I jako kryterium decyzyjnego pozwala na wybór właściwej drogi realizacji działań związanych z opracowaniem widma obciążenia oraz wyznaczenia niezbędnej, ze względu na realizację obliczeń, charakterystyki zmęczeniowej. Ocena szerokości widma obciążenia na podstawie współczynnika I pozwala ograniczyć stosowanie złożonego aparatu statystycznego wymagającego szczegółowej wiedzy w zakresie interpretacji wyników oraz specjalistycznego oprogramowania.

Omawiana praca zawiera wyniki badań eksperymentalnych wybranych stali konstrukcyjnych wraz ze szczegółowym opisem realizacji eksperymentu. Wymienione wyniki dotyczą zakresu obciążeń statycznych i cyklicznych dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = -1$  i  $R = 0$ , co stanowi istotne poszerzenie wiedzy w zakresie własności mechanicznych stali konstrukcyjnych szeroko stosowanych w budowie maszyn. Powyższe ma istotne znaczenie praktyczne.

#### **4.3. Podstawowe osiągnięcie naukowe w jednotematycznym cyklu publikacji – podsumowanie**

Podstawowym osiągnięciem naukowym jednotematycznego cyklu publikacji jest:

- a) w zakresie badań doświadczalnych, oryginalna metoda programowanych badań trwałości zmęczeniowej oparta na losowym pobieraniu cykli o zmiennych parametrach obciążenia z widma obciążeń 2D w postaci tablicy korelacyjnej,
- b) w zakresie obliczeń trwałości zmęczeniowej, oryginalny algorytm obliczeń oparty na zastosowaniu widma obciążeń 2D i dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej 2D.

Program obciążeń według koncepcji losowego pobierania cykli z tablicy korelacyjnej opracowanej dla metod: zliczania pełnych cykli, zliczania par zakresów i metody rain flow, spełnia kryteria podobieństwa w stosunku do obciążenia losowego, opartego na zgodności rozkładu lokalnych ekstremów.

Ostatecznym potwierdzeniem wartości autorskiej metody programowanych badań są wyniki jej doświadczalnej weryfikacji, polegającej na porównaniu wyników badań w warunkach obciążeń losowych z wynikami badań w warunkach obciążeń programowanych. Analiza porównawcza 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. Umożliwia wstępną optymalizację cech konstrukcyjnych elementów maszyn i urządzeń ze względu na trwałość zmęczeniową. Ogranicza w późniejszych fazach istnienia wytworu zakresu badań doświadczalnych, co ma istotne znaczenie w ograniczeniu czaso- i kosztochłonności procesów projektowych, wytwórczych i eksploatacyjnych. W ostatnim przypadku umożliwiają opracowanie skutecznych metod diagnostyki stanu zmęczenia materiału elementów maszyn i urządzeń.

Należy podkreślić, że opracowanie algorytmu obliczeń było poprzedzone rozwiązaniem szczegółowych problemów z zakresu: analizy obciążeń eksploatacyjnych i ich pomiaru, weryfikacją doświadczalną metod schematyzacji, weryfikacją doświadczalną dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych oraz analizą wpływu rodzaju wymuszenia obciążenia na trwałość zmęczeniową.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych**

### **5.1. Podsumowanie dorobku naukowego**

Poza głównym nurtem zainteresowań naukowych omawianych w jednotematycznym cyklu publikacji (p.4) dotyczącym analizy doświadczalnej i obliczeniowej trwałości



zmęczeniowej stali konstrukcyjnych w warunkach obciążeń losowych, moja działalność naukowa obejmowała szereg zadań pokrewnych i rozszerzających zakres badań.

1. Zagadnienia metodyczne programowanych badań zmęczeniowych w tym:
  - pomiary i analiza obciążeń eksploatacyjnych [II.B.a.10; II.B.b.10],
  - metody schematyzacji (metody zliczania cykli) obciążeń eksploatacyjnych [II.A.a.2; II.A.b.2],
  - metody opracowania widm i programów obciążeń [II.A.b.1; II.A.b.3; II.A.b.6; II.A.b.7; II.A.b.8; II.B.a.6; II.B.b.5; II.B.b.9],
  - programowane badania zmęczeniowe [II.A.b.1; II.A.b.5; II.B.b.8].
2. Metody obliczeń trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych [II.B.a.2; II.B.b.3].
3. Badania i modelowanie własności mechanicznych materiałów, szczególnie własności cyklicznych metali i ich stopów [II.A.b.4; II.B.a.3; II.B.a.4; II.B.a.7; II.B.a.11; II.B.a.13; II.B.b.2; II.B.b.4; II.B.b.6; II.B.b.7].
4. Weryfikacja doświadczalna metod obliczeń trwałości zmęczeniowej [II.B.b.1].
5. Problematyka robotyki i mechatroniki [II.B.b.11; II.B.b.12] oraz patenty [5.2.1; 5.2.2; 5.2.3].

Z wymienionych wyżej zagadnień i pozycji publikacji według wykazu (załącznik 3), jako istotniejsze wymieniam (załącznik 7) następujące prace:

[B1] **Ligaj B.:** *Influence of stress and strain control on cyclic properties of AW-2017A aluminium alloy*, Journal of Polish CIMAC, 2012. (Punkty MNiSW: 6. Praca przyjęta do druku.) [Zał. 3, II.B.a.4]

W pracy tej wykazano, że prowadząc badania w warunkach kontrolowanego zakresu zmian naprężeń uzyskuje się różne wyniki w stosunku do wyników badań w warunkach kontrolowanego zakresu zmian odkształceń. Powyższe stwierdzenie ma istotne znaczenie w przypadku wyboru metody wyznaczania własności cyklicznych metali i ich stopów adekwatnej do charakteru obciążenia eksploatacyjnego. W przypadku obciążenia dynamicznego (siły masowe) powinien to być test z kontrolowanym zakresem naprężeń, a w przypadku obciążenia kinematycznego (obciążenie spowodowane np. niewspółosiowością

czopów wałów) powinien to być test z kontrolowanym zakresem odkształceń. Badania przeprowadzono w zakresie niskocyklowego zmęczenia.

- [B2] **Ligaj B.:** *Impact of the Method of Elaboration of a Load Spectrum on the Results of the Calculation of S355J0 Steel Fatigue*, Journal of Polish CIMAC, vol. 5 no. 3, 2010. (Punkty MNiSW: 9.) [Zał. 3, II.B.a.6]

Podstawowym celem pracy było wykazanie wpływu metody zliczania cykli na obliczeniową trwałość zmęczeniową. Obliczenia przeprowadzono z zastosowaniem liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych – przyjętą jako czynnik stały. Jako zmienne przyjęto metody zliczania cykli: lokalnych ekstremów, rozpiętości gałęzi, par zakresów i pełnych cykli. Z analizy danych obliczeniowych wynika, że najniższą wartość trwałości otrzymano z obliczeń z zastosowaniem metody zliczania lokalnych ekstremów, najwyższą zaś według metody rozpiętości gałęzi. Najbliższe doświadczalnym są wyniki obliczeń według metody pełnych cykli.

- [B3] **Ligaj B.:** *Generalization of Goodman's diagram on the high-cycle fatigue range*, Journal of Polish CIMAC, vol. 5, no. 3, 2010, pp. 71-79. (Punkty MNiSW: 9. Praca uzupełniona i rozszerzona w stosunku do pracy II.B.b.6.) [Zał. 3, II.B.a.7]

W artykule opisano model dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej  $N(S_a, S_m)$  opartej na koncepcji wykresu Goodmana. Opisany model zweryfikowano doświadczalnie, wykazując zależność różnic pomiędzy wynikami obliczeń i badań w zależności od wartości współczynnika asymetrii cyklu. Powyższe stanowi wskazanie kierunków dalszej modyfikacji analizowanego modelu matematycznego dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej.

- [B4] **Ligaj B., Szala G.:** *Fatigue life calculation in conditions of wide spectrum random loadings - the experimental verification of a calculation algorithm on the example of 41Cr4 steel*, Materials Science Forum, Fatigue Failure and Fracture Mechanics vol. 726, 2012 r., pp. 17-26. (Punkty MNiSW: 13. Praca uzupełniona i rozszerzona w stosunku do pracy II.B.b.1 – wydawnictwo pokonferencyjne.) (Mój udział w pracy określono na 60% i dotyczył: studiów literaturowych z zakresu obliczeń trwałości zmęczeniowej, sformułowania problemu badań własnych, współudział w realizacji badań doświadczalnych oraz analizy wyników badań oraz współudziału w opracowaniu wniosków.) [Zał. 3, II.B.a.2]

Głównym celem artykułu jest doświadczalna weryfikacja algorytmu obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek ze stali stopowej 41Cr4 w warunkach obciążeń losowych o szerokim widmie z zastosowaniem dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych. Jako kryterium oceny szerokości widma przyjęto współczynnik  $I$  będący stosunkiem liczby przecięć poziomu wartości średniej obciążeń do liczby lokalnych ekstremów. Obliczenia

przeprowadzono z zastosowaniem pięciu wybranych dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych. W analizie wyników badań wykazano, że model dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej, oznaczony jako I-M i II, pozwolił na uzyskanie wyników obliczeń najbliższych wynikom badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej.

[B5] Szala G., Ligaj B.: *Description of cyclic properties of steel in variability conditions of mean values and amplitudes of loading cycles*, Materials Science Forum, Fatigue Failure and Fracture Mechanics vol. 726, 2012 r., pp. 69-76. (Punkty MNiSW: 13.)  
(Mój udział w pracy określono na 40% i dotyczył: opracowania metodyki i programu obliczeń, realizacji obliczeń trwałości zmęczeniowej oraz opracowania redakcyjnego.) [Zal. 3, II.B.a.3]

W pracy zostały przedstawione zagadnienia związane z opisem własności zmęczeniowych stali i ich stopów za pomocą dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych. Głównym celem pracy było opracowanie matematycznego modelu dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej, która spełniałaby warunek zgodności wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych oraz posiadałaby prosty i uniwersalny opis. Opracowany model jest modyfikacją modeli I i IM w zakresie zmienności współczynnika asymetrii cyklu  $R$  ( $-\infty < R < -1,0$ ). Uniwersalność modelu polega na tym, że umożliwia on opisywanie linii stałych trwałości dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych, które odpowiadają przypadkom linii: typ A – wypukłe linie, typ B – wklęsłe linie i typ C – przypadek mieszany linii stałych trwałości (wklęsłe dla zakresu wysokocyklowego zmęczenia oraz wypukłe dla zakresu niskocyklowego zmęczenia). Tej właściwości nie posiada żaden ze znanych modeli dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych opisanych w literaturze. Przedstawione zależności matematyczne opisujące zmodyfikowany model IM zweryfikowano doświadczalnie wynikami badań stali konstrukcyjnej C45 i 41Cr4. Wynika z nich, że postać linii stałych trwałości doświadczalnych dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych w zakresie niskocyklowego zmęczenia odpowiada typowi A, natomiast w zakresie WCZ odpowiada typowi B.

W algorytmie obliczeń trwałości zmęczeniowej należy wprowadzić odpowiednie kryterium nisko- i wysokocyklowego zmęczenia, ponieważ w obliczeniach eksploatacyjnych elementów konstrukcyjnych występują jednocześnie cykle o wartościach parametrów z wymienionych zakresów. Wskazuje to na konieczność stosowania dwuparametrycznej charakterystyki zmęczeniowej typ C.

Zestawienie zbiorcze osiągnięć naukowych:

Wyszczególnienie	Przed doktoratem	Po doktoracie	Ogółem
Rozprawy i monografie	1	1	2
Publikacje i referaty			
- Publikacje w czasopiśmie naukowych (w tym LF, K-PAN, CZ) <sup>1)</sup>	2 (2)	16 (5)	18 (7)
- Publikacje w materiałach konferencyjnych i referaty (w tym międzynarodowe)	8	14 (4)	22 (4)
Łącznie	11 (2)	31 (9)	42 (11)
Patenty i wzory użytkowe	-	3	3
Projekty badawcze (w tym kierownictwo)	1 (1)	7	8 (1)
Badania w ramach współpracy z przemysłem (w tym kierownictwo zespołów)	1	9 (9)	10 (9)

1)

- LF – Lista Filadelfijska  
 K-PAN – Kwartalnik Komitetu Budowy Maszyn PAN  
 CZ – Czasopisma zagraniczne

## 5.2. Patenty i wzory użytkowe

1. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej dnia 31.07.2008 podjął decyzję o udzielenie prawa ochronnego na wzór użytkowy nadając numer Ru63841 na wynalazek pt.: *Manipulator kątowy zwłaszcza do zmiany położenia elementów z wewnętrznymi powierzchniami walcowymi*. Współautorzy: Krzysztof Ciechacki, Zbigniew Kuszyński.
2. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej dnia 28.12.2011 r. podjął decyzję o udzielenie prawa ochronnego na PATENT nr 211682 będący wynalazkiem pt.: *Rama przesuwna manipulatora kąтового*. Współautorzy: Krzysztof Ciechacki, Zbigniew Kuszyński.
3. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej dnia 24.07.2012 r. podjął decyzję o udzielenie prawa ochronnego na patent nr 382584 na wynalazek pt.: *Stół obrotowy manipulatora kąтового z chłodzoną częścią mocującą*. Współautorzy: Krzysztof Ciechacki, Zbigniew Kuszyński.

### 5.3. Udział w badaniach naukowych

1. Udział w realizacji badań w ramach projektu badawczego nr 7 T07B 010 18 pt.: *Badania zmęczeniowe złożonych elementów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych*. Źródło finansowania: Komitet Badań Naukowych z siedzibą w Warszawie. Data rozpoczęcia: 2000 r., data zakończenia: 2002 r. Status realizatora: wykonawca.
2. Realizacja badań w ramach projektu badawczego nr 1137/T07/2002/22 pt.: *Analiza obciążeń eksploatacyjnych elementów konstrukcyjnych za pomocą tablic korelacyjnych w obliczeniach i badaniach trwałości zmęczeniowej*. Źródło finansowania: Komitet Badań Naukowych z siedzibą w Warszawie. Data rozpoczęcia: 05.2002 r., data zakończenia: 04. 2003 r. Status realizatora: kierownik i jednocześnie główny wykonawca.
3. Udział w realizacji badań w ramach projektu badawczego nr 1493/T07/2005/28 pt.: *Analiza energochłonności technologicznego ścinania w procesach rozdrabniania ziaren zbóż*. Komitet Badań Naukowych z siedzibą w Warszawie. Data rozpoczęcia: 2005 r., data zakończenia: 2008 r. Status realizatora: wykonawca.
4. Udział w realizacji międzynarodowego (Polska, Finlandia, Czechy) projektu badawczego specjalnego Nr EUREKA/61/2006 realizowany w ramach europejskiej inicjatywy Eureka E!3496 IMPERJA pt.: *Poprawa trwałości zmęczeniowej połączeń nitowych stosowanych w konstrukcjach lotniczych*. Data rozpoczęcia: 2006 r., data zakończenia: 2009 r. Status realizatora: wykonawca.
5. Udział w realizacji badań w ramach projektu badawczego nr 0715/B/T02/2008 pt.: *Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja*. Źródło finansowania: Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego z siedzibą w Warszawie. Data rozpoczęcia: 09. 2008 r., data zakończenia: 08. 2011 r. Status realizatora: główny wykonawca.
6. Udział w realizacji badań w ramach projektu badawczego nr 2221/B/T02/2010/39 pt.: *Hybrydowa metoda obliczeń trwałości zmęczeniowej i jej doświadczalna weryfikacja na przykładzie wyników badań zmęczeniowych stopów aluminium i stali*. Źródło finansowania: Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego z siedzibą w Warszawie. Data rozpoczęcia: 2010 r., data zakończenia: 2013 r. Status realizatora: główny wykonawca.

7. Badania Statutowe BS 4/2002 pt.: *Metody eksperymentalne w badaniach zmęczeniowych materiałów i elementów konstrukcyjnych*. Okres realizacji projektu: 2002 r.-2008 r. Status realizatora: wykonawca.
8. Badania Statutowe BS 25/2009 pt.: *Doświadczalne metody badań własności mechanicznych materiałów i struktur w konstruowaniu i diagnozowaniu obiektów technicznych*. Okres realizacji projektu: 2009 r.-2011 r. Status realizatora: wykonawca.
9. Badania Własne BW 10-2002 pt.: *Metody konstruowania maszyn ze względu na przeciwdziałanie zmęczeniowemu pękaniu*. Okres realizacji projektu: 2002 r.-2006 r. Status realizatora: wykonawca.
10. Badania Własne BW 15/2007 pt.: *Analityczne, numeryczne, doświadczalne i hybrydowe procedury analizy zmęczeniowej złożonych struktur w obliczeniach trwałości zmęczeniowej i ocenie stanu uszkodzenia zmęczeniowego*. Okres realizacji projektu: 2007 r.-2009 r. Status realizatora: wykonawca.

#### **5.4. Współpraca z przemysłem**

1. Badania zlecone przez Kable BFK Bydgoszcz. Temat badań: *Badania kabli energetycznych*. Data realizacji: 09.1999 r. Status realizatora: wykonawca.
2. Praca badawczo-rozwojowa w ramach programu „Bon na Innowację” dla firmy Polaris Sp. z o.o. Temat: *Opracowanie technologii produkcji i wykonanie stanowiska do produkcji przepustnicy wielopłaszczyznowej dla systemów wentylacji*. Data realizacji: 09.2010 r. - 11.2010 r. Status realizatora: kierownik zespołu i główny wykonawca.
3. Badania zlecone przez firmę Z. L. P. Trokotex Sp. z o.o., ul. Wapienna 10, 87-100 Toruń. Temat: *Wyznaczenie własności laminatu poliestrowo-szklanego poddanego obciążeniom rozciągającym (wg PN-EN ISO 527) i trzypunktowemu zginaniu (wg PN-EN ISO 178 i PN-EN ISO 14125)*. Data realizacji: 04.2011 r. Status realizatora: kierownik zespołu i główny wykonawca.
4. Badania zlecone przez firmę KLIMAT SOLEC Sp. z o.o. Temat: *Wyznaczenie wytrzymałości stopy podporowej 300x300 w warunkach obciążeń statycznych*. Data realizacji: 06.2011 r. Status realizatora: kierownik zespołu i główny wykonawca.

5. Opracowanie opinii o innowacyjności na temat: *Wytwarzanie kształtowników profilowanych na zimno z dwóch taśm stalowych*, na zlecenie firmy DP STAL Sp. z o.o. Data realizacji: 11.2011 r. Status realizatora: kierownik zespołu i główny wykonawca.
6. Praca badawczo-rozwojowa w ramach programu „Voucher Badawczy” dla firmy Z. L. P. Trokotex Sp. z o.o., ul. Wapienna 10, 87-100 Toruń. Temat: *Zaprojektowanie konstrukcji urządzenia do wykonywania walcowych odcinków poszycia zbiorników z laminatu poliestrowo-szklanego na bazie włókna ciągłego oraz układu jego sterowania*. Data realizacji: 02.2012 r. - 05.2012 r. Status realizatora: kierownik zespołu i główny wykonawca.
7. Badania zlecone przez firmę Robotic s.c. Iwona Hyska, Sebastian Hyska, ul. Muszłowa 21, 85-435 Bydgoszcz. Temat: *Badanie własności mechanicznych stali S355J2+N w warunkach statycznego rozciągania*. Data realizacji: 04.2012 r. Status realizatora: kierownik zespołu i główny wykonawca.
8. Badania zlecone przez firmę FPUH „METEX-C.K.” Danuta Kuciewicz-Bejgerowska, Henryk Cichy, ul. Wróblowa 11, 85-437 Bydgoszcz. Temat: *Badanie składu chemicznego materiału noża krążkowego*. Data realizacji: 03.2012 r. Status realizatora: kierownik zespołu i główny wykonawca.
9. Badania zlecone przez firmę Z. L. P. Trokotex Sp. z o.o., ul. Wapienna 10, 87-100 Toruń. Temat: *Ocena wytrzymałości krat pomostowych typu RT40/25P, RTK40/30P, RT40/38P i RTK40/40P w warunkach obciążeń statycznych*. Data realizacji: 03.2010 r.-04.2010 r. Status realizatora: kierownik zespołu i główny wykonawca.
10. Badania zlecone przez firmę Z. L. P. Trokotex Sp. z o.o., ul. Wapienna 10, 87-100 Toruń. Temat: *Badanie wytrzymałości połączenia ucha transportowego ze ścianą zbiornika wykonanego z laminatu*. Data realizacji: 10.2007 r.-11.2007 r. Status realizatora: kierownik zespołu i główny wykonawca.

## 5.5. Nagrody i wyróżnienia

1. Dyplom Dziekana Wydziału Mechanicznego Akademii Techniczno-Rolniczej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy za wyróżniające wyniki osiągnięte na studiach magisterskich, 2000 r.

2. Wyróżnienie w Ogólnopolskim Konkursie organizowanym przez SIMP na najlepszą pracę dyplomową o charakterze mechanicznym, 2001 r.
3. Nagroda zespołowa I stopnia Rektora Akademii Techniczno-Rolniczej za wyróżniające osiągnięcia w działalności naukowej – 2002 r.
4. Dwie nagrody zespołowe II stopnia Rektora Akademii Techniczno-Rolniczej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy za wyróżniające osiągnięcia w działalności naukowej w 2004 i 2006 roku.
5. List gratulacyjny Dziekana za pracę na rzecz Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego – 2011 r.

#### **5.6. Działalność na rzecz uczelni**

1. Członek Wydziałowej Komisji ds. Tytułu Naukowego i Stopni Naukowych wybrany na lata 2012 r.-2016 r.
2. Udział w pracach Komisji Rekrutacyjnej Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy w roku akademickim: 2007/2008, 2008/2009 i 2009/2010.
3. Budowa eksponatów oraz opis obserwowanych zjawisk fizycznych w ramach tworzonej Pracowni Doktora Ciekawskiego będącej wynikiem współpracy Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego z firmą Family Park z siedzibą w Bydgoszczy. Termin realizacji: 03.2008 r. – 09.2009 r.
4. Budowa eksponatu interaktywnego dla Muzeum Inżynierii Miejskiej w Krakowie włączonego do wystawy zatytułowanej „Wokół Koła”. Termin realizacji: 07.2009 r. – 09.2009r.
5. Organizacja wykładów akademickich połączonych z prezentacją Instytutowego Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji oraz pokazem walk robotów miniSumo dla uczniów Szkoły Podstawowej nr 66 z Bydgoszczy. Termin realizacji: 10.2010 r. – 03.2011r.
6. Organizacja wycieczki dla studentów I roku studiów, kierunku Mechanika i Budowa Maszyn do zakładów Z.L.P. Trokotex Sp. z o.o., ul. Wapienna 10, 87-100 Toruń oraz Towimor S.A., ul. Starotoruńska 5, 87-100 Toruń. Data wycieczki: czerwiec 2011 r. Wycieczka zorganizowana w ramach projektu nr POKL.04.01.02-



00-166/11-00 tytuł: „*Studia inżynierskie gwarancją rozwoju UTP i społeczeństwa opartego na wiedzy*”. Kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Janusz Prusiński.

7. Organizacja wycieczki dla studentów I roku studiów, kierunek Mechanika i Budowa Maszyn do Cukrowni Chełmża, ul. Bydgoska 4, 87-140 Chełmża. Data wycieczki: grudzień 2011 r. Wycieczka zorganizowana w ramach projektu nr POKL.04.01.02-00-166/11-00 tytuł: „*Studia inżynierskie gwarancją rozwoju UTP i społeczeństwa opartego na wiedzy*”. Kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Janusz Prusiński.

### **5.7. Członkostwo w zrzeszeniach, stowarzyszeniach i organizacjach naukowych**

1. European Structural Integrity Society (ESIS) – członkostwo.
2. Polska Akademia Nauk, Komitet Budowy Maszyn, Międzysekcyjny Zespół Zmęczenia i Mechaniki Pęknięcia Materiałów i Konstrukcji – ekspert.
3. Polskie Towarzystwo Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej – członkostwo.