

## Załącznik nr 2

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych albo artystycznych, w szczególności osiągnięcia, o którym mowa w 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. z 2018 r. poz. 1789) (w j. polskim)

# Autoreferat

Dr inż. Jarosław Szusta

A handwritten signature in black ink, appearing to be the initials 'JS', located in the bottom right corner of the page.

## Spis treści

1. Imię i nazwisko .....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej .....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych .....	3
4. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe, o którym mowa w 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. 2018 r. poz.1789) .....	3
A. Tytuł osiągnięcia naukowego .....	3
B. Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego .....	3
4.1. Cel naukowy badań, dyskusja wyników i możliwości ich wykorzystania ...	6
4.1.1. Przegląd literatury w zakresie badań i modelowania kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w tym również w podwyższonej temperaturze .....	6
4.1.2. Cel naukowy .....	8
4.1.3. Badania doświadczalne kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w podwyższonej temperaturze .....	8
4.1.3a. Stanowisko badawcze .....	8
4.1.3b. Badania doświadczalne w zakresie obciążeń jednoosiowych i w podwyższonej temperaturze .....	9
4.1.3c. Badania doświadczalne w zakresie obciążeń dwuosiowych i w podwyższonej temperaturze .....	9
4.1.4. Analiza wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych .....	11
4.1.5. Prognozowanie trwałości zmęczeniowej i praktyczne wykorzystanie opracowanych zależności .....	14
4.1.6. Główne osiągnięcia prowadzonych badań .....	17
4.1.7. Literatura .....	18
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego .....	20
5.1. Dorobek w zakresie osiągnięć naukowo badawczych .....	20
5.2. Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach .....	21
5.3. Cel naukowy pozostałych osiągnięć badawczych, dyskusja wyników i możliwości ich wykorzystania .....	24

**1. Imię i nazwisko**

Jarosław Szusta

**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**

**magister inżynier:** kierunek: mechanika i budowa maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, czerwiec 2002 r.; Temat pracy: *Wytrzymałość zmęczeniowa metali przy nieproporcjonalnym obciążeniu momentem skręcającym i siłą rozciągającą*, promotor: dr hab. inż. Walenty Osipiuk

**doktor nauk technicznych:** Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka - dyscyplina naukowa: mechanika, specjalność: mechanika materiałów, lipiec 2008 r.; Temat rozprawy: *Modelowanie kumulacji uszkodzeń wywołanej złożonymi obciążeniami niskocyklowymi*, promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Seweryn (Politechnika Białostocka)

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

od 01.10.2001 r. do 30.06.2002 r. - stażysta, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

od 01.10.2002 r. do 29.02.2004 r.- asystent, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

od 01.03.2004 r. do 30.09.2009 r. - asystent, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

od 01.10.2009 r. - adiunkt, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

**4. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe, o którym mowa w 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. 2018 r. poz.1789)**

**A. Tytuł osiągnięcia naukowego**

*Wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa elementów konstrukcyjnych w zakresie jedno- i dwuosiowych obciążeń w podwyższonej temperaturze*

**B. Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego**

Osiągnięcie naukowe stanowi cykl 6 powiązanych tematycznie publikacji z lat 2009-2018, oraz 3 zgłoszenia patentowe.

## **Publikacje w recenzowanych czasopismach, indeksowanych w bazie JCR**

- H1. J. Szusta, A. Seweryn: Damage accumulation modeling under uniaxial low cycle fatigue at elevated temperatures, *Engineering Failure Analysis*, 56, 2015, pp. 474-483, (mój udział szacuję na 80%), **IF-5 = 1,289; liczba cytowań: 6**

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na: sformułowaniu problemu badawczego, przygotowaniu przeglądu literatury, zaprojektowaniu próbek i stanowiska badawczego, zaplanowaniu i przeprowadzeniu badań doświadczalnych, analizie uzyskanych rezultatów, opracowaniu modelu obliczeniowego, wykonaniu obliczeń weryfikujących model.

- H2. Ö. Karakas, J. Szusta: Monotonic and low cycle fatigue behaviour of 2024-T3 aluminium alloy between room temperature and 300°C for designing VAWT Components, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 39, 2016, pp. 95-109 (mój udział szacuję na 70%) ,**IF-5 = 1,927; liczba cytowań: 17**

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na: sformułowaniu problemu badawczego, przygotowaniu przeglądu literatury, przeprowadzeniu analizy postaci pętli histerezy uzyskanych w trakcie badań zmęczeniowych, wykonaniu obliczeń numerycznych parametrów uszkodzenia Smitha-Watsona-Toppera.

- H3. J. Szusta, A. Seweryn: Experimental study of the low-cycle fatigue life under multiaxial loading of aluminum alloy EN AW-2024-T3 at elevated temperatures, *International Journal of Fatigue*, 96, 2017, pp. 28-42 (mój udział szacuję na 80%), **IF-5 = 3,250; liczba cytowań: 10**

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na: sformułowaniu problemu badawczego, przygotowaniu przeglądu literatury, zaprojektowaniu próbek i stanowiska badawczego, przeprowadzeniu badań doświadczalnych w zakresie obciążeń złożonych, wykonaniu badań mikroskopowych otrzymanych przełomów zmęczeniowych i analizie uzyskanych rezultatów.

- H4. Ö. Karakas, J. Szusta: Bauschinger effect at elevated temperatures in a 2024-T3 aluminum alloy for designing wind turbine components, *Materials Testing*, 59(9), 2017, pp. 735–743 (mój udział szacuję na 65%), **IF-5 = 0,477; liczba cytowań: 0**

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na: sformułowaniu problemu badawczego, przygotowaniu przeglądu literatury, przeprowadzeniu analizy wpływu efektu Bauschigera na trwałość zmęczeniową materiału eksploatowanego w warunkach podwyższonej temperatury.

- H5. J. Szusta: Low cycle fatigue of metallic materials under uniaxial loading at elevated temperature, *International Journal of Fatigue*, 114, 2018, pp. 272–281, **IF-5 = 3,250; liczba cytowań: 1**
- H6. J. Szusta, A. Seweryn: Fatigue damage accumulation modeling of metals alloys under high amplitude loading at elevated temperature, *Metals*, 8(12), 2018, 1030 <https://doi.org/10.3390/met8121030> (mój udział szacuję na 80%), **IF-5 = 1,899; liczba cytowań: 0**

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na: sformułowaniu problemu badawczego, przygotowaniu przeglądu literatury, aplikacji modelu kumulacji uszkodzeń, wykonaniu obliczeń numerycznych weryfikujących model, analizie uzyskanych wyników.

#### *Zgłoszenia patentowe*

- P1. J. Szusta: Sposób mocowania badanych próbek w podwyższonych temperaturach; *PL394719-A1*; Politechnika Białostocka
- P2. J. Szusta: Adapter do mocowania ekstensometru liniowego na próbce; *PL 394751-A1*; Politechnika Białostocka
- P3. J. Szusta: Wysokotemperaturowy ekstensometr poprzeczny; *PL 399119-A1*; Politechnika Białostocka

#### 4.1. Cel naukowy badań, dyskusja wyników i możliwości ich wykorzystania

##### *4.1.1. Przegląd literatury w zakresie badań i modelowania kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w tym również w podwyższonej temperaturze*

Elementy maszyn zwłaszcza w przemyśle energetycznym, lotniczym, motoryzacyjnym, chemicznym, petrochemicznym narażone są w czasie ich eksploatacji na działanie obciążeń cyklicznie zmiennych, w tym także w podwyższonej temperaturze. Pojęcie podwyższonej temperatury może tu być definiowane zgodnie z pracą (Chen et al, 1999), jako temperatura odpowiadająca 2/3 temperatury topnienia litego materiału  $T_c$ . Właściwości: wytrzymałościowe, zmęczeniowe materiału wraz ze wzrostem temperatury w większości przypadków obniżają się w kontrolowany (przewidywany sposób), aż do momentu osiągnięcia pewnej granicznej wartości temperatury (Zhang, 2010, Bar-Cohen, 2014). Eksploatacja obiektów technicznych w tych warunkach może być bezpieczna w przypadku, gdy znana jest odpowiedź materiału na warunki obciążenia i środowiska pracy. Jednak nieznaczne przekroczenie górnej granicy umownej temperatury podwyższonej sprawia, że właściwości materiału nie da się bezpośrednio przewidzieć. Wytrzymałość materiału gwałtownie obniża się, a użytkowanie obiektów w tych warunkach może zagrażać bezpieczeństwu.

Wraz ze wzrostem temperatury mechanizmy pękania zmęczeniowego stopów metali ulegają zmianie (Samec i inni, 2011). Wiąże się to głównie ze zmianami w strukturze wewnętrznej materiału. W wysokiej temperaturze wpływ granic ziaren na ciągłość materiału staje się znaczący. Granice ziaren mogą ograniczać kruchość materiału i stanowić miejsce gromadzenia się dyslokacji. W wielu pracach (He i inni, 2002, Peve i inni, 2014, Mariappan i inni, 2016) przyjęto założenie, że materiał konstrukcyjny eksploatowany w podwyższonej temperaturze nie jest już tym samym materiałem, którym był w temperaturze pokojowej. W materiale zachodzą bowiem pewne przemiany fizyko-chemiczne, struktura materiału ulega przebudowaniu, sieć krystalograficzna zmienia się, pozostawiając stały skład chemiczny. W związku z takim podejściem można stosować znane z literatury kryteria wytrzymałościowe, zmęczeniowe, kumulacyjne, przyjmując w nich stałe materiałowe wyznaczone doświadczalnie dla rozważanych wartości temperatury (Nagode i Zingsheim, 2004; Keum i inni, 2009). Takie podejście sprawia, że kryteria kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych sformułowane dla temperatury otoczenia można uogólnić na warunki podwyższonej temperatury poprzez wprowadzenie stałych materiałowych wyznaczanych dla analizowanych zakresów temperatury.

Badania doświadczalne kumulacji uszkodzeń i pękania stopów metali, szczególnie w podwyższonej temperaturze, mają duże znaczenie zarówno poznawcze, jak i użytkowe. Są podstawą formułowania modeli obliczeniowych trwałości zmęczeniowej, jak i samego zrozumienia procesów degradacji materiału. Uzyskiwane charakterystyki zmęczeniowe

materiałów konstrukcyjnych są cenne z punktu widzenia praktycznego, szczególnie w analizie niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji (Polak i inni 1998, Nagode i Hack, 2004). Wspomniane badania są jednak kosztowne i wymagają zaawansowanego wyposażenia laboratoryjnego. Stąd też liczba danych eksperymentalnych trwałości zmęczeniowej w podwyższonej temperaturze w literaturze jest niewystarczająca do opracowania i modyfikacji zależności obliczeniowych.

W pracy [H5] dokonano przeglądu literatury w zakresie badań doświadczalnych materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych do produkcji elementów eksploatowanych w podwyższonej temperaturze. Na bazie zgromadzonych literaturowych danych eksperymentalnych dla różnych stopów metali konstrukcyjnych dokonano analizy wpływu podwyższonej temperatury na właściwości wytrzymałościowe i parametry zmęczeniowe różnych materiałów konstrukcyjnych. Dane eksperymentalne dla rozważanych materiałów pozyskano z następujących prac: stop aluminium ENAW2024T3 [H1], AA6061-T6 (Zakarik i inni, 2013), żeliwo sferoidalne EN-GJS-500-7 (Samec i inni, 2011), żeliwo szare EN-GJL-250 (Peve i inni, 2014), staliwo modyfikowane Cr-Mo-V (Li i inni, 2014), stal ferrytyczna 8Cr-2WvTa (Ishie i inni 1998), stal modyfikowana (RAFM) JLF-1 (Mariappan i inni, 2016), stal stopowa 10 CrMo 9 10 oraz X22CrMoV121 (Nagode i Zingsheim, 2004, Nagode i Hack, 2004), stop kobaltu Co-29Cr-6Mo (Tunthawiroon i inni, 2017), superstop 617M (Shankar i inni, 2017), stopy Inconel 718 (Schlesinger i inni 2017), (Maderbacher i inni 2013), stopu HAYNES HR-120 (He i inni, 2002), super stop niklu 720Li (Gopinath i inni 2009), stal nierdzewna ACI HH50 (Kim i Jang, 2010), implantacyjny stop tytanu Ti-6Al-4V (Altenberger i inni, 2012), TNB-V2 (Heckel i Christ; 2009). W pracy tej analizowano również przebiegi zmian modułu Younga w funkcji temperatury dla rozpatrywanych stopów metali. Wykazano, że jego wartości zmniejszają się w sposób liniowy przy wzroście temperatury. Ponadto dla analizowanych materiałów obserwowana jest tendencja zwiększania się wydłużenia wraz ze wzrostem temperatury. Związane to może być ze zmniejszaniem się zdolności magazynowania energii wewnętrznej w materiale (zmianą struktury wewnętrznej stopów metali).

Prezentowane w literaturze modele kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych materiałów eksploatowanych w warunkach obciążeń niskocyklowych w podwyższonej temperaturze stanowią w większości przypadków zmodyfikowane zależności, które formułowane były do szacowania trwałości materiału w temperaturze pokojowej. Przykładem mogą tu być zależności: Mansona-Coffina, Ramberga-Osgooda, Smitha-Watsona-Toppera. W modelach tych parametry materiałowe wyznacza się niezależnie dla każdej analizowanej temperatury. Sam proces obliczania tych parametrów nie jest skomplikowany, jednak przygotowanie danych do ich wyznaczenia jest bardzo kosztowne i czasochłonne oraz wymaga użycia specjalistycznej aparatury badawczej. Dlatego też w celu ograniczenia ilości niezbędnych badań eksperymentalnych potrzebnych do wyznaczenia stałych modelu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, podjęto próbę opracowania zależności pozwalającej na wyznaczenie



trwałości zmęczeniowej materiału bez potrzeby przeprowadzania czasochłonnych i kosztownych eksperymentów.

#### **4.1.2. Cel naukowy**

Celem naukowym podjętych działań było:

- zbadanie wpływu podwyższonej temperatury na właściwości wytrzymałościowe i zmęczeniowe stopów metali;
- opracowanie zależności obliczeniowych pozwalających na prognozowanie trwałości zmęczeniowej materiałów eksploatowanych zarówno w warunkach jedno- oraz dwuosiowych obciążeń w podwyższonej temperaturze;

#### **4.1.3. Badania doświadczalne kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w podwyższonej temperaturze**

##### **4.1.3a. Stanowisko badawcze**

Badania materiałów konstrukcyjnych w podwyższonych i wysokich temperaturach należą do najbardziej skomplikowanych testów. Proces badawczy wymaga precyzyjnej koordynacji temperatury środowiska pracy materiału próbki oraz przebiegu zadawanego obciążenia zewnętrznego. Ograniczona przestrzeń komory pieca grzejnego wymusza stosowanie specjalnej konstrukcji cięgien umożliwiających przeniesienie obciążenia z maszyny wytrzymałościowej na próbki badawcze. Zazwyczaj stosowane są rozwiązania wymagające użycia specjalnie przygotowanych próbek zwłaszcza w części chwytowej, tak aby nie następowało ich luzowanie w trakcie trwania próby. Wykorzystuje się zwykle próbki gwintowane w części chwytowej. Zacisk próbek w uchwytach następuje zwykle poprzez mechanizm śrubowy uniemożliwiający wysuwanie próbek badawczych z uchwytów. Cięgna umożliwiają mocowanie tylko jednego rodzaju próbek oraz zapewniają realizację wyłącznie jednego rodzaju obciążenia (zazwyczaj rozciągającego). Wady powszechnie stosowanych rozwiązań stanowisk do przeprowadzania prób określających wytrzymałość w podwyższonych i wysokich temperaturach sprawiły, że podjęto próbę opracowania oryginalnego rozwiązania uniwersalnego uchwytu do mocowania próbek badawczych [H3], [P1]. W pracy [H3] zaprezentowano unikatowe stanowisko badawcze do wyznaczania trwałości zmęczeniowej materiału w podwyższonej temperaturze. Składało się ono z dwuosiowej maszyny wytrzymałościowej MTS 858 MiniBionix, wysokotemperaturowych uchwytów hydraulicznych (własnej konstrukcji – których zastrzeżenia zawarto w zgłoszeniu [P1]), trójstrefowego pieca oporowego MAYTEC oraz zmodyfikowanego wysokotemperaturowego ekstensometru dwuosiowego MTS 632.68F-08 [P3]. Wyposażenie

maszyny wytrzymałościowej w prezentowane uchwyty zapewniło trwałe i pewne mocowanie próbek badawczych w komorze pieca. Proponowane rozwiązanie mocowania próbek badawczych umożliwia ponadto realizację obciążenia zarówno w zakresie rozciągania-ściskania, jak i skręcania, ze współczynnikiem asymetrii cyklu  $R = -1$ , czego nie są w stanie zapewnić proponowane przez firmy komercyjne rozwiązania cięgien. Uchwyty zostały zaprojektowane do obciążeń osiowych  $\pm 25$  kN oraz  $\pm 100$  Nm, do współpracy z maszyną wytrzymałościową MTS 858 MiniBionix.

Na przygotowanym stanowisku przeprowadzono badania doświadczalne wyznaczania właściwości wytrzymałościowych i zmęczeniowych próbek wykonanych z lotniczego stopu aluminium EN AW 2024T3 zarówno w zakresie obciążeń monotonicznych, jak i cyklicznie zmiennych (jednoosiowych oraz złożonych – proporcjonalnych i nieproporcjonalnych).

#### ***4.1.3b. Badania doświadczalne w zakresie obciążeń jednoosiowych i w podwyższonej temperaturze***

W pracy [H1] przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej lotniczego stopu aluminium EN AW-2024T3 w warunkach podwyższonej temperatury w zakresie obciążeń jednoosiowych. W badaniach wykorzystano opracowane uchwyty wysokotemperaturowe [P1] oraz zmodyfikowaną konstrukcję ekstensometru wysokotemperaturowego [P2], [P3]. Rozpatrywano 4 poziomy temperatury: 20, 100, 200 oraz 300°C. Badania, przeprowadzono na próbkach walcowych o średnicy 6,5 mm, które po nagraniu do zadanej temperatury obciążano ze stałą wartością amplitudy odkształcenia całkowitego w zakresach: 0,6, 0,8, 0,95, 1 oraz 1,5%. Obciążenie realizowano w zakresie jednoosiowego rozciągania-ściskania ze współczynnikiem asymetrii cyklu  $R_{\epsilon} = -1$ , z częstotliwością zmian obciążenia 1 Hz oraz trójkątnym przebiegiem obciążenia. Moment inicjacji pęknięcia określono na podstawie analizy przebiegu maksymalnej wartości siły w cyklu obciążenia. Jako kryterium inicjacji pęknięcia przyjęto 10% obniżenie wartości siły w stosunku do jej wartości maksymalnej na danym poziomie odkształcenia. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono parametry wytrzymałościowe i zmęczeniowe, w tym krzywą trwałości zmęczeniowej Mansona-Coffina-Basquina. Dzięki tym badaniom zidentyfikowano mechanizmy towarzyszące pękaniu materiału w warunkach obciążeń wysokoamplitudowych w podwyższonej temperaturze. Badania te stały się podstawą do opracowania zależności obliczeniowych szacowania trwałości zmęczeniowej materiału.

#### ***4.1.3c. Badania doświadczalne w zakresie obciążeń dwuosiowych i w podwyższonej temperaturze***

W kolejnym etapie badań doświadczalnych przeprowadzono testy związane z wyznaczaniem trwałości zmęczeniowej materiału w warunkach złożonych obciążeń w

podwyższonej temperaturze. W eksperymencie wykorzystano próbki rurkowe wykonane ze stopu aluminium EN AW 2024T3, które poddano cyklicznemu, proporcjonalnemu (przebieg RS0) oraz nieproporcjonalnemu (przebiegi RS45, RS90, R1S2, R2S1) rozciąganiu ze skręcaniem (tab. 1).

**Tab. 1.** Przebiegi obciążeń złożonych i odpowiadające im wartości zmiennej sterującej przy założeniu stałego ilorazu odkształceń maksymalnych

Ozn.	Historia obciążenia	Przebieg obciążenia
RS0		
RS45		
RS90		
R1S2		
R2S1		

Badania zmęczeniowe przeprowadzono dla różnych kombinacji odkształceń osiowych i postaciowych oraz dla 4 wartości temperatury: 20, 100, 200 oraz 300 °C. Wymuszeniem kinematycznym próbki sterowano za pomocą zmodyfikowanego ekstensometru dwuosowego [P2], [P3], wykorzystując do tego celu przyrosty składowych odkształcenia (liniowego  $\epsilon$  i postaciowego  $\gamma$ ) uśrednionego na odcinku bazy pomiarowej o długości 25 mm. W trakcie obciążania próbek założono utrzymywanie stałego ilorazu

maksymalnego odkształcenia liniowego i postaciowego w cyklu obciążenia:  $\varepsilon_a / \gamma_a = \sqrt{3}$ . Najpierw próbki poddano działaniu złożonych obciążeń zmęczeniowych z trójkątnym przebiegiem cyklu odzerowo-tętniącego z maksymalną wartością plastycznego odkształcenia wzdłużnego  $\varepsilon_{\max} = 0,003$  oraz  $\gamma_{\max} = 0,00173$ . Kolejne badanie polegało na poddaniu próbek rurkowych cyklicznemu obciążeniu z maksymalną wartością plastycznego odkształcenia wzdłużnego  $\varepsilon_{\max} = 0,005$  oraz postaciowego  $\gamma_{\max} = 0,00289$ . Obciążenie nieproporcjonalne realizowano za pomocą przesunięcia fazowego pomiędzy przebiegami czasowymi składowych (liniowej i postaciowej) wektora odkształcenia na płaszczyźnie prostopadłej do osi próbki. Badania zmęczeniowe w zakresie obciążeń przesuniętych w fazie przeprowadzono dla kilku wartości kąta przesunięcia fazowego odkształcenia liniowego i postaciowego (przebiegi RS45, RS90, R1S2, R2S1). Wyniki tych badań przedstawiono w pracy [H3].

#### ***4.1.4. Analiza wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych***

W pracy [H1] na podstawie analizy danych uzyskanych w trakcie badań jednoosiowych dla stopu aluminium EN AW 2024T3 oraz danych literaturowych otrzymanych dla modyfikowanej stali żarowytrzymałej 8Cr-2WVTa (Ishie i inni 1998), wykazano, że dla materiałów metalicznych niezależnie od przynależności do grupy (stopy aluminium, stale) podwyższona temperatura wywołuje podobne oddziaływanie na obciążany cyklicznie materiał. W obu przypadkach następowało obniżenie parametrów wytrzymałościowych wraz ze wzrostem temperatury badania (w pracy określono postać przebiegu tych zmian).

W pracy [H2] przeanalizowano pętle histerezy uzyskane podczas cyklicznego obciążania próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW 2024T3 w podwyższonej temperaturze. Zbadano postacie przebiegu maksymalnych i minimalnych wartości naprężenia w cyklu obciążenia w trakcie realizacji procesu deformacji próbki, aż do momentu inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. Porównując naprężenia  $\sigma_{\max}$  i  $\sigma_{\min}$  dla każdej analizowanej temperatury, stwierdzono, że różnica wartości bezwzględnych tych naprężeń zmniejsza się wraz ze wzrostem trwałości zmęczeniowej w miarę wzrostu temperatury badania. Dalsza ocena wykazała, że zjawisko cyklicznego umacniania się materiału zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Dokonano także określenia wpływu naprężenia średniego na trwałość zmęczeniową materiału. W tym celu wyznaczono parametr uszkodzenia Smitha-Watsona-Toppera dla każdej analizowanej temperatury. Zauważono, że wraz ze wzrostem temperatury badania, efekt wpływ naprężenia średniego na trwałość zmęczeniową materiału był większy.

W pracy [H3] przeanalizowano mikrobudowę przełomów zmęczeniowych uzyskanych w trakcie badań doświadczalnych, w których próbki poddawane były jednoczesnemu działaniu siły rozciągającej i momentu skręcającego w podwyższonej temperaturze. Badania mikroskopowe uwidoczniły miejsca inicjacji pęknięć w postaci pustek wokół wydzielenia faz

międzymetalicznych. Szczególnie widoczne jest to na przelomach, gdzie odkształcenie powstałe wskutek skręcania nie zniekształciło powierzchni pęknięcia (RS0-100, RS90-100, R2S1-200). Zaobserwowano także pojedyncze pustki na odsłoniętych przez pęknięcie granicach ziaren. Ich powstanie można wiązać z lokalnymi wykruszeniami wydzielania faz międzymetalicznych. Występowanie maksymalnych wartości naprężeń normalnych i tnących w tym samym czasie w cyklu obciążenia (przebieg RS0) powoduje, że przelomy zmęczeniowe dla wszystkich zadanych wartości temperatury mają regularne powierzchnie, o niewielkiej wygładzonej teksturze. Pojawiające się uszkodzenia w kierunku działania obciążenia rozciągającego są w tym samym momencie ścinane, co sprawia, że powierzchnia przelomu jest gładka, pozbawiona większych nierówności. Wraz ze wzrostem temperatury badania wysokość nierówności na powierzchni przelomu staje się mniejsza, gdyż materiał robi się bardziej ciągliwy. Charakterystyczne wydają się także obrazy przelomów przy obciążeniu RS45 (100°C, 200°C). Na całej powierzchni przelomu pojawiają się warstwowe uskoki rozmieszczone wzdłuż kierunku naprężeń tnących, przy czym w temperaturze 100°C mają charakter quasi-lupliwy, natomiast przy wyższej temperaturze można zaobserwować linie ekstruzji i intruzji biegnące wzdłuż pęknięć. Ich obecność może być spowodowana przemieszczaniem pasm poślizgu. Zwiększenie przesunięcia fazowego między przebiegami obciążeń w cyklu do kąta 90° (RS90) sprawia, że na powierzchni przelomu zmęczeniowego ponownie pojawia się struktura o regularnie zarysowanych kształtach o znacznie mniejszych nierównościach tekstury w stosunku do przebiegu RS45. Zupełnie inny obraz przedstawiają przelomy otrzymane podczas realizacji badań w temperaturze 300°C. Tu charakter przelomu praktycznie nie zależy od sposobu przykładanego obciążenia. Na wszystkich próbkach przelom ma charakter ciągliwy, nie widać miejsc pęknięć pierwotnych, które zostały „zatarte” w trakcie kolejnych cykli odkształcenia. Można wnioskować, że na skutek uplastycznienia materiału w tej temperaturze następowało odwarstwienie i przemieszczenie fragmentów materiału, w których zachodziło większe odkształcenie.

Analiza uzyskanych wyników w zakresie badań złożonych prowadzi do poniższych wniosków

1. Zarówno w przypadku obciążeń jednoosiowych (rozciąganie/ściskanie), jak i dwuosiowych (rozciąganie/ściskanie + skręcanie), proporcjonalnych i nieproporcjonalnych, trudno jednoznacznie określić zależność trwałości zmęczeniowej od temperatury. W każdym jednak przypadku obciążenia (jednoosiowego i złożonego) wraz ze wzrostem temperatury spada trwałość zmęczeniowa stopu aluminium EN AW-2024-T3. Osiąga ona bardzo niską wartość w temperaturze bliskiej temperatury rekrytalizacji (ok 400°C).
2. Wraz ze wzrostem przesunięcia fazowego pomiędzy przebiegami obciążenia rozciągającego i skręcającego w temperaturze podwyższonej obserwowano wzrost trwałości zmęczeniowej stopu aluminium EN AW 2024-T3.
3. Wzrost liczby cykli rozciągających w bloku obciążenia, dla każdej zadawanej temperatury (od 20 do 300°C), powodował obniżenie trwałości zmęczeniowej w

porównaniu do trwałości zmęczeniowej uzyskanej dla proporcjonalnego bloku obciążenia. Natomiast wzrost liczby cykli skręcających w bloku obciążenia dla rozpatrywanego zakresu temperatury nie skutkowało zmniejszeniem trwałości zmęczeniowej próbek w porównaniu do trwałości zmęczeniowej uzyskanej dla proporcjonalnego bloku obciążenia.

W pracy [H4] na podstawie zestawionych przebiegów wartości szczytowych pętli histerezy uzyskanych w trakcie jednoosiowego rozciągania próbek ze stopu aluminium EN AW-2024T3 w podwyższonej temperaturze analizowano wpływ efektu Bauschingera na trwałość zmęczeniową materiału. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że dla wszystkich analizowanych temperatur i zakresów odkształcenia cyklicznego stop aluminium EN AW-2024T3 ujawnia wyraźnie efekt Bauschingera. Jest on bardziej widoczny dla mniejszych wartości odkształcenia całkowitego. Co więcej, wzrost temperatury zmniejsza ten efekt dla wszystkich analizowanych poziomów obciążenia. Można to przypisać łatwiejszym przemieszczeniom dyslokacji w podwyższonej temperaturze. Potwierdzają to wykonane badania mikroskopowe, gdzie obserwowano zdecydowanie więcej plastycznych pęknięć zmęczeniowych pojawiających się wraz ze wzrostem temperatury badania. Ponadto zaobserwowano, że naprężenia maksymalne w cyklu obciążenia  $\sigma_{\max}$  zmniejszają się wraz ze wzrostem temperatury. Również różnica między naprężeniem  $\sigma_{\max}$ , a modułem naprężenia  $|\sigma_{\min}|$  znacznie spada w wyższych temperaturach badania. Przy większych wartościach zakresu odkształcenia całkowitego następowało zmniejszenie wartości naprężeń średnich dla każdej badanej temperatury.

W pracy [H5] na podstawie zgromadzonych danych literaturowych wykonano analizę mikrobudowy przełomów zmęczeniowych, która ukazała zmianę mechanizmu pęknięcia wraz ze wzrostem temperatury badania. Na powierzchni przełomów zmęczeniowych w podwyższonej temperaturze (w odróżnieniu do temperatury otoczenia) ukazuje się coraz więcej charakterystyczny dla pęknięcia ciągliwego układów wgłębień i wypukłości, które tworzą tzw. budowę plastrową. Wgłębienia powstają prawdopodobnie z mikroporów, mikropustek istniejących w materiale bądź tworzą się w wyniku plastycznych odkształceń lub dekohezji. W pracy zestawiono także parametry krzywej trwałości zmęczeniowej Mansona-Coffina-Basquiniana w funkcji temperatury badania dla analizowanych stopów metali. Analiza przebiegów parametrów tej zależności w funkcji temperatury dostarczyła informacji o braku możliwości ujednoczonego opisu matematycznego funkcji zmiany tych parametrów wraz ze wzrostem temperatury badania.

#### 4.1.5. Prognozowanie trwałości zmęczeniowej i praktyczne wykorzystanie opracowanych zależności

Na podstawie badań opisanych w pracach [H1-H6] i obserwacji zachowania się materiału w podwyższonej temperaturze na skutek działania obciążeń cyklicznie zmiennych oraz wyników badań eksperymentalnych nielicznie występujących w literaturze zaproponowano półempiryczne zależności do prognozowania trwałości zmęczeniowej stopów metali. W modelu tym przyjęto, że wraz ze wzrostem temperatury badania (izotermicznego) następuje spadek trwałości zmęczeniowej materiału. Spadek ten jest tym wyraźniejszy im niższa jest temperatura topnienia materiału. Założono ponadto, że istnieje temperatura graniczna  $T_m$ , przy której dany materiał nie ma już żadnej wytrzymałości doraźnej. Znając zatem wartość tej temperatury i przebieg funkcji określającej spadek trwałości zmęczeniowej wraz z jej wzrostem, można z inżynierską dokładnością dokonać obliczenia liczby cykli do inicjacji pęknięcia dla danego poziomu temperatury i amplitudy jednoosiowego odkształcenia. W związku z tym należy określić funkcję wpływu temperatury na trwałość zmęczeniową materiału. W tym celu dokonano zestawienia liczby cykli do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego w funkcji temperatury badania dla analizowanych stopów metali. Zauważono, że w przypadku działania stałoamplitudowych obciążeń jednoosiowych o dużej amplitudzie można dokonać parametrycznego opisu uzyskanych wyników pomiarowych w układzie współrzędnych ( $N_f$  – liczba cykli do inicjacji pęknięcia,  $T$  – temperatura badania). Uzyskane przebiegi liczby cykli  $N_f$  obciążenia względem temperatury, można aproksymować funkcjami liniowymi. Przebiegi tych funkcji odpowiadające zadawanym poziomom odkształcenia całkowitego (dla jednoosiowego rozciągania-ściskania) zbieżne są do jednego punktu odpowiadającego temperaturze bliskiej temperatury rekrytalizacji materiału, przy której materiał nie ma już doraźnej wytrzymałości.

Algorytm postępowania przy wyznaczaniu trwałości zmęczeniowej stopów metali zgodnie z prezentowanym podejściem jest następujący:

**I Etap** wymaga wykonania badań doświadczalnych pozwalających na określenie parametrów krzywej trwałości zmęczeniowej Mansona-Coffina-Basquina materiału w temperaturze otoczenia (badanie nie wymaga używania skomplikowanej aparatury, do jego przeprowadzenia niezbędna jest jedynie maszyna wytrzymałościowa oraz dynamiczny ekstensometr, minimalna ilość próbek badawczych 18).

**II Etap** znając wartość temperatury granicznej materiału  $T_m$ , przy której jego wytrzymałość zmęczeniowa jest zerowa, w układzie współrzędnych ( $T, N_f$ ) łączy się liniami prostymi punkt  $P_T$  o współrzędnych ( $T_m, 0$ ) z wyznaczonymi w pierwszym etapie punktami  $P_i(\varepsilon)$  o współrzędnych ( $20^\circ\text{C}, N_f(i)$ ) odpowiadającymi wartościami liczby cykli zmian obciążenia do inicjacji pęknięcia dla danych zakresów odkształcenia uzyskanych w temperaturze otoczenia. Punkty zlokalizowane na wyznaczonych w ten sposób prostych odpowiadają liczbie cykli obciążenia do momentu inicjacji pęknięcia dla przyjętej temperatury i poziomu odkształcenia.

Zaproponowaną metodę szacowania trwałości zmęczeniowej stopów metali w zakresie obciążeń jednoosiowych zweryfikowano, uwzględniając wyniki własnych badań doświadczalnych oraz danych dostępnych w literaturze. Rezultaty obliczeń zamieszczono w pracach [H1, H5]. Dla większości z analizowanych materiałów proponowane podejście pozwala prognozować trwałość zmęczeniową materiału w temperaturze podwyższonej z inżynierską dokładnością. Większe różnice pomiędzy prognozą, a danymi doświadczalnymi pojawiają się dla mniejszych wartości amplitudy odkształcenia całkowitego, zatem proponowany model zgodnie z założeniami powinien być stosowany dla zakresu niskocyklowego zmęczenia.

W pracy [H3] sprawdzono czy opracowaną dla obciążeń jednoosiowych metodę prognozowania trwałości zmęczeniowej materiału w podwyższonej temperaturze można wykorzystać dla przypadku działania złożonych obciążeń cyklicznych. Wykorzystano w tym celu zdefiniowaną uprzednio wartość temperatury granicznej materiału oraz dane eksperymentalne uzyskane dla stopu aluminium EN AW-2024T3. W przypadku obciążeń dwuosowych funkcja trwałości zmęczeniowej nie jest już funkcją liniową (jak miało to miejsce dla obciążeń jednoosiowych), a wykładniczą. Jej postać uzależniona jest od historii obciążenia, materiału próbki oraz warunków zewnętrznych.

Kolejny etap badań nad prognozowaniem trwałości zmęczeniowej materiału w podwyższonej temperaturze skupiał się na poszukiwaniu innych metod jej szacowania. W tym zakresie dokonano modyfikacji opracowanego wcześniej odkształceniowego modelu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, tak aby przy jego pomocy istniała możliwość opisu procesu kumulacji uszkodzeń w materiałach eksploatowanych w warunkach obciążeń zmęczeniowych w podwyższonej temperaturze. Na podstawie obserwacji przełomów zmęczeniowych uzyskanych w czasie badań eksperymentalnych zauważono, że pod wpływem cyklicznych zmian naprężenia w podwyższonej temperaturze, na wypolerowanych powierzchniach próbek najpierw tworzą się linie poślizgów, przekształcające się wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia w zmęczeniowe pasma poślizgów (liczne równoległe uskoki). Podobnie jak się to ma w temperaturze otoczenia zaproponowano kryterium kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych oparte na założeniu, że stan uszkodzenia materiału zależy głównie od zmiennych poślizgów na płaszczyznach fizycznych i naprężeń normalnych na tych płaszczyznach. Przyjęto tu, że za generowanie nowych uszkodzeń i szybszy rozwój już istniejących odpowiedzialne jest naprężenie rozciągające w cyklu obciążenia, naprężenie ściskające natomiast spowalnia proces kumulacji uszkodzeń. Prezentowane prawo kumulacji uszkodzeń wywołanej odkształceniami plastycznymi w warunkach podwyższonej temperatury powiązано z naprężeniową funkcją kumulacji uszkodzeń  $\Psi_p$ , której wartość zależna jest od wartości naprężeń normalnych  $\sigma_n$ , zmiennej stanu uszkodzenia  $\omega_n$  na płaszczyźnie fizycznej oraz temperatury  $T$ . Przyrost zmiennej stanu uszkodzenia na płaszczyźnie fizycznej  $d\omega_n$ , spowodowany rozwojem odkształceń plastycznych w podwyższonej temperaturze  $T$ , uzależniono od przyrostu plastycznych odkształceń postaciowych  $d\gamma_n^p$  na tej płaszczyźnie.



$$\begin{cases} d\omega_n(\sigma, d\varepsilon, T) = A_p(T) \Psi_p(\sigma_n, \omega_n, T) |d\gamma_n^p| & \text{dla } \sigma > 0 \text{ i } d\varepsilon > 0 \\ d\omega_n(\sigma, d\varepsilon, T) = 0 & \text{dla } \sigma \leq 0 \text{ i } d\varepsilon \leq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

gdzie:  $A_p(T)$  jest zmienną materiałową opisującą ewolucję właściwości plastycznych materiału w zależności od aktualnego stanu naprężenia i temperatury.

Założono że inicjacja pęknięcia nastąpi wówczas, gdy zmienna stanu uszkodzenia wywołana odkształceniami plastycznymi na dowolnej płaszczyźnie fizycznej osiągnie wartość krytyczną. W prezentowanym modelu wartości naprężeń i odkształceń wyznacza się niezależnie dla każdej temperatury badania, wykorzystując uogólnione prawo Hooke'a, warunek plastyczności Hubera-von Misesa, stowarzyszone z warunkiem plastyczności gradientowe prawo płynięcia oraz wielopowierzchniowy model wzmocnienia materiału Mroza-Garuda. Są one integralną częścią modelu obliczeniowego kumulacji uszkodzeń, pozwalają na określenie stanu naprężenia i odkształcenia w dowolnym stanie obciążenia.

Niewątpliwą zaletą proponowanego w pracy [H6] zmodyfikowanego modelu jest możliwość uwzględnienia historii obciążenia w procesie kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Realizowane jest to w momencie wyznaczania składowych tensorów odkształcenia bądź naprężenia w zależności od sposobu realizacji wymuszenia (siłowe/przemieszczeniowe). Badania weryfikujące opracowany model pokazują, że w początkowej fazie obciążenia na skutek działania cyklicznych obciążeń z każdym cyklem wymuszenia wysokoamplitudowego następuje stopniowe narastanie uszkodzenia, aż do momentu osiągnięcia przez materiał pewnego stanu granicznego. Po jego przekroczeniu „gęstość uszkodzeń” jest na tyle duża, że materiał nie jest już w stanie przenosić w bezpieczny sposób zadanego obciążenia. Następuje proces związany z pojawianiem się w materiale mikropęknięć, które prowadzą w dalszej fazie obciążania do gwałtownego narastania uszkodzeń. Przyrastają one już w postępie wykładniczym, aż do momentu wystąpienia makropęknięć prowadzących do dekohezji materiału. Podwyższona temperatura sprzyja kumulacji uszkodzeń poprzez łatwiejsze uplastycznienie materiału – dyslokacje w materiale łatwiej mogą się przemieszczać. Ponadto temperatura materiału zmienia charakter pęknięcia, oraz szybkość jego zniszczenia.

Uzyskane w trakcie realizacji zadania badawczego dane mają znaczenie użytkowe i są cenne z inżynierskiego punktu widzenia. Opracowane zależności mogą być wykorzystane w obliczeniach zmęczeniowych do wyznaczania liczby cykli działania obciążenia stałopłytowego, aż do momentu wystąpienia inicjacji pęknięcia w podwyższonej temperaturze.

#### 4.1.6. Głównie osiągnięcia prowadzonych badań

- opracowanie stanowiska badawczego, pozwalającego na wyznaczanie trwałości zmęczeniowej materiałów w zakresie obciążeń jednoosiowych, jak i złożonych w tym również w podwyższonej temperaturze (opatentowane konstrukcje uchwytów oraz adapterów czujników przemieszczenia);
- analiza wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej stopów metali. W badaniach wykorzystano techniczny stop aluminium EN AW 2024T3. Badania doświadczalne prowadzono zarówno w zakresie obciążeń monotonicznych (rozciganie, ściskanie, skręcanie) oraz cyklicznie zmiennych dla stałopłitudowych obciążeń odpowiadających niskocyklowej trwałości zmęczeniowej;
- określenie wpływu podwyższonej temperatury na cykliczne właściwości stopu aluminium EN AW 2024T3; wyznaczenie parametru uszkodzenia Smitha-Watsona-Toppera oraz określenie wpływu naprężenia średniego na trwałość zmęczeniową materiału poddawanego działaniu cyklicznych obciążeń w podwyższonej temperaturze;
- zbadanie wpływu podwyższonej temperatury na występowanie efektu Bauschingera w lotniczym stopie aluminium EN AW-2024T3;
- analiza mikrobudowy otrzymanych w trakcie badań doświadczalnych przelomów zmęczeniowych oraz identyfikacja mechanizmów pęknięcia materiału;
- sformułowanie półempirycznych zależności obliczeniowych, które mogą być wykorzystane do prognozowania trwałości zmęczeniowej stopów metali w podwyższonej temperaturze;
- modyfikacja opracowanego wcześniej modelu obliczeniowego kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, powiązanego z płaszczyzną fizyczną, tak aby przy jego pomocy możliwa była analiza kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w warunkach podwyższonej temperatury;
- określenie temperatury granicznej (bliskiej temperaturze rekrytalizacji materiału), przy której nie ma on doraźnej wytrzymałości, dla analizowanych stopów metali. Parametr ten jest istotny przy prognozowaniu trwałości zmęczeniowej z użyciem opracowanego podejścia;
- weryfikacja opracowanych zależności obliczeniowych, dla różnych stopów metali w warunkach stałopłitudowych obciążeń zmęczeniowych, wykorzystując zarówno własne badania doświadczalne, jak i dane dostępne w literaturze. Dokonano porównania wyników określania trwałości zmęczeniowej materiałów wyznaczonej przy pomocy opracowanych zależności obliczeniowych z modelami szacowania trwałości dostępnymi w literaturze. Weryfikacja pozwoliła stwierdzić, że proponowane zależności umożliwiają wyznaczać trwałości zmęczeniowej z inżynierską dokładnością w całym zakresie analizowanych obciążeń i temperatury;



- analiza przebiegu procesu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych podczas cyklicznego obciążania próbek w podwyższonej temperaturze (określenie przebiegu narastania zmiennej stanu uszkodzenia w trakcie procesu cyklicznej deformacji materiału);

#### 4.1.7. Literatura

1. L.J. Chen, Z.G. Eang, G. Yao, J.F. Tian, 1999. The influence of temperature on low cycle fatigue behavior of nickel base superalloy GH4049. *International Journal of Fatigue*. 21, 791-797.
2. J. Zhang, 2010. High temperature deformation and fracture of materials. *Woodhead Publishing*.
3. Y.Bar-Cohen, 2014. High temperature materials and mechanisms. *CRC Press*.
4. M. Nagode, F. Zingsheim, 2004, An online algorithm for temperature influenced fatigue-life estimation: strain-life approach. *International Journal of Fatigue*. 26, 155-161.
5. B. Samec, I. Potrc, M. Sraml, 2011, Low cycle fatigue of nodular cast iron used for railway brake discs, *Engineering Failure Analysis*. 18, 1424-1434.
6. Y.H. He, L.J. Chen, P.K. Liaw, R.L. McDaniels, C.R. Brooks, R.R. Seeley, D.L. Klarstrom, 2002, Low-cycle fatigue behavior of HAYNES HR-120 alloy, *International Journal of Fatigue*. 24, 931-942.
7. M. Pevec, G. Oder, I. Potrc, M. Sraml, 2014, Elevated temperature low cycle fatigue of grey cast iron used for automotive brake discs, *Engineering Failure Analysis*. 42, 221-230.
8. K. Mariappan, Vani Shankar, R. Sandhya, K. Laha, 2016, Low cycle fatigue design data for India-specific reduced activation ferritic-martensitic (IN-RAFM) steel, *Fusion Engineering and Design*. 104, 76-83.
9. K.A. Zakaria, S. Abdullah, M.J. Ghazali, C.H. Azhari, 2013, Influence of spectrum loading sequences on fatigue life in a high-temperature environment, *Engineering Failure Analysis*. 30, 111-123.
10. M. Pevec, G. Oder, I. Potrc, M. Sraml, 2014, Elevated temperature low cycle fatigue of grey cast iron used for automotive brake discs, *Engineering Failure Analysis*. 42, 221-230.
11. Z. Li, J. Han, W. Li, L. Pan, 2014, Low cycle fatigue behavior of Cr-Mo-V low alloy steel used for railway brake discs, *Materials and Design*. 56, 146-157.
12. T. Ishii, K. Fukaya, Y. Nishiyama, M. Suzuki, M. Eto, 1998, Low cycle fatigue properties of 8Cr-2WVTa ferritic steel at elevated temperatures. *Journal of Nuclear Materials*. 258-263: 1183-1186.
13. J. Polák, J. Helešic, M. Klesnil, 1998, Effect of elevated temperatures on the low cycle fatigue of 2.25Cr-1Mo steel Part I: constant amplitude straining. Low cycle fatigue, *ASTM STP 942, Philadelphia: American Society for Testing and Materials*; 43-57.

14. M. Nagode, M. Hack, 2004, An online algorithm for temperature influenced fatigue life estimation: stress–life approach. *International Journal of Fatigue*. 26, 163–171.
15. P. Tunthawiroona, , Y Lib, Y Koizumia, A. Chibaa, 2017, Strain-controlled isothermal fatigue behavior of Co–29Cr–6Mo used for tooling materials in Al die casting, *Materials Science & Engineering A*. 703, 27–36.
16. V. Shankar, A. Kumar, K. Mariappan, R. Sandhya, K. Laha, A.K. Bhaduri, N. Narasaiah, 2017, Occurrence of dynamic strain aging in Alloy 617M under low cycle fatigue loading, *International Journal of Fatigue* 100, 12–20.
17. M. Schlesinger, T. Seifert, J. Preussner, 2017, Experimental investigation of the time and temperature dependent growth of fatigue cracks in Inconel 718 and mechanism based lifetime prediction, *International Journal of Fatigue* (99/ 2), 242-249.
18. H. Maderbacher , B. Oberwinkler, H.-P. Gänser, W. Tan, M. Rollett, M. Stoschka, 2013, The influence of microstructure and operating temperature on the fatigue endurance of hot forged Inconels 718 components, *Materials Science & Engineering A*. 585, 123–131.
19. Y.H. He, L.J. Chen, P.K. Liaw, R.L. McDaniels, C.R. Brooks, R.R. Seeley, D.L. Klarstrom, 2002, Low-cycle fatigue behavior of HAYNES HR-120 alloy, *International Journal of Fatigue*. 24, 931–942.
20. K. Gopinath, A.K. Gogia, S.V. Kamat, R. Balamuralikrishnan, U. Ramamurty, 2009, Low cycle fatigue behaviour of a low interstitial Ni-base superalloy, *Acta Materialia*. 57, 3450–3459.
21. Yoon-Jun Kim, J. Ho, 2010, High temperature fatigue resistance of an ACI HH50-type cast austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering*. 527, 5415–5420.
22. I. Altenberger, R. K. Nalla, Y. Sano, L. Wagner, R. O. Ritchie, 2012, On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti–6Al–4V at elevated temperatures up to 550 °C. *International Journal of Fatigue*. 44, 292–302.
23. T.K. Heckel, H. J. Christ, 2009, Thermomechanical Fatigue of the TiAl Intermetallic Alloy TNB-V2. *Experimental Mechanics*.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego

5.1. Dorobek w zakresie osiągnięć naukowo badawczych:

*Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie JCR, niewchodzących w osiągnięcie naukowe w myśl ustawy:*

**Publikacje z listy czasopism punktowanych (część A) – indeksowanych w bazie JCR**

- D1. J. Szusta, A. Seweryn: Low-cycle fatigue model of damage accumulation – The strain approach *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (10), 2010, pp. 1604-1616 (mój udział szacuję na 80%), **IF-5 = 1,832**
- D2. J. Szusta, A. Seweryn: Fatigue damage accumulation modelling in the range of complex low-cycle loadings – The strain approach and its experimental verification on the basis of EN AW-2007 aluminum alloy, *International Journal of Fatigue*, 33(2), 2011, pp. 255-264 (mój udział szacuję na 80%), **IF-5 = 1,822**
- D3. Ł. Derpeński, J. Szusta, A. Seweryn: Damage accumulation and ductile fracture modeling of notched specimens under biaxial loading at room temperature, *International Journal of Solids and Structures*, 134 (1), 2018, pp. 1-19 (mój udział szacuję na 30%), **IF-5 = 2,864**
- D4. A. Falkowska, A. Seweryn, J. Szusta: Predicting the fatigue strength and life of 316L steel sinters of varying porosity for implants in a uniaxial loading state; *Engineering Fracture Mechanics*, 200, 2018, pp 146-165 (mój udział szacuję na 30%), **IF-5 = 2,705**
- D5. K. Majerski, B. Surowska, J. Bieniaś, J. Szusta: Study of low-cycle fatigue of glass-hybrid laminates, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 19(2), 2018, pp. 489-495 (mój udział szacuję na 25%), **IF-5 = 0,772**
- D6. E. Weresa, A. Seweryn, J. Szusta, Z. Rak: Fatigue testing of transmission gear, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 17(2), 2015, pp. 207-214 (mój udział szacuję na 25%), **IF-5 = 1,013**

- D7. J. Szusta, A. Tomczyk, O. Karakas: Experimental Investigation of Thin Films with Various Overprints Used for Packaging Labels, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 97, 2018, pp. 467-477 (mój udział szacuję na 40%), **IF-5 = 2,516**
- D8. J. Szusta, A., Tomczyk, O. Karakas: A new method for estimating the clamping force of shrink sleeve label, *Materials*, MDPI 11, 2018, doi: 10.3390/ma11122544 (mój udział szacuję na 40%), **IF-5 = 3,325**
- D9. Ö. Karakaş, J. Szusta, N. Tüzün: Monotonic mechanical properties of titanium Grade 5 (6Al-4V) welds made by microplasma, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 100, 2019, pp.27-38 (mój udział szacuję na 50%), **IF-5 = 2,516**

#### **Publikacje z listy czasopism punktowanych (część B)**

- D10. R. Kaczyński, J. Szusta: Konstrukcja dwustopniowego aerogeneratora z pionową osią obrotu ze wstępnym spiętrzaniem powietrza, *Pneumatyka*, 2(83), 2012, pp.16-19 (mój udział szacuję na 60%)
- D11. J. Szusta: Modelowanie kumulacji uszkodzeń wywołanej obciążeniami cyklicznie zmiennymi, *Modelowanie Inżynierskie*, 10(41), 2011 pp. 395-402
- D12. J. Szusta A. Seweryn: Kumulacja uszkodzeń w warunkach złożonych obciążeń niskocyklowych. Cz. 1: badania doświadczalne, *Modelowanie Inżynierskie*, 7(38), 2009 pp. 213-220 (mój udział szacuję na 80%)
- D13. J. Szusta A. Seweryn: Kumulacja uszkodzeń w warunkach złożonych obciążeń niskocyklowych. Cz. 2: model obliczeniowy, *Modelowanie Inżynierskie*, 7(38), 2009 pp. 221-228 (mój udział szacuję na 80%)

#### **Monografie**

- M1. Ł. Derpeński, A. Falkowska, A. Seweryn, J. Szusta: *Modelowanie zagadnień kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych i pękania elementów konstrukcyjnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2013 (mój udział szacuję na 30%)

#### **5.2. Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach:**

- PB1. 2018/29/B/ST8/00697 – projekt badawczy w ramach konkursu OPUS: *Modelowanie kumulacji uszkodzeń i pękania materiałów konstrukcyjnych w warunkach złożonych obciążeń zmęczeniowych, także z uwzględnieniem*

*predeformacji pelzaniowej oraz podwyższonej temperatury*, finansowany ze środków NCN, realizowany w Politechnice Białostockiej w latach 2019 - 2021 – **wykonawca**;

- PB2. 2017/01/X/ST5/01092 – projekt badawczy w ramach konkursu MINIATURA 1: *Badania kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w warunkach obciążeń niskocyklowych w tym w podwyższonej temperaturze* – finansowany ze środków NCN, realizowany w Politechnice Białostockiej w latach 2017 - 2018 – **kierownik**;
- PB3. POIR.01.02.00-00-0072/16 – projekt badawczo rozwojowy w ramach programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 działanie 1.2: *Modularny system obserwacyjno-inspekcyjny oparty na latającej platformie wielowirnikowej zasilanej ze stacji naziemnej* – współfinansowany ze środków NCBR, realizowany w Politechnice Białostockiej i firmie Moose Sp. z o.o. w latach 2017 – 2019 – **wykonawca zadania**;
- PB4. WND- POKL.08.02.01-20-103/12 – projekt badawczy: „*Transfer technologii do przemysłu*” w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki 2007-2013, Priorytet VIII Regionalne kadry gospodarki, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.1 Wsparcie dla współpracy sfery nauki i przedsiębiorstw, finansowany ze środków Unii Europejskiej, realizowany w Politechnice Białostockiej w latach 2013 - 2014, nazwa zadania badawczego:
- *Analiza procesu obkurczania etykiet termokurczliwych w celu poprawy jakości wyrobu i zmniejszenia energochłonności procesu* - **kierownik zadania**;
  - *Opracowanie konstrukcji i wdrożenie do produkcji siłowni wiatrowej o pionowej osi obrotu* - **główny wykonawca zadania**;
- PB5. N501 120536 - projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego: *Modelowanie sprężysto-plastycznych zagadnień kumulacji uszkodzeń i pęknięcia elementów konstrukcyjnych w złożonym stanie obciążenia* – finansowany ze środków MNiSW, realizowany w Politechnice Białostockiej w latach 2009 – 2013 – **wykonawca**;
- PB6. N504 340336 - projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, realizowany w Politechnice Śląskiej w latach 2014 – 2016 – **wykonawca**;
- PB7. W/WM/25/2011 - projekt badawczy własny służący rozwojowi młodych naukowców: *Badania doświadczalne kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w warunkach złożonych obciążeń w podwyższonej temperaturze*, realizowany w Politechnice Białostockiej w 2011 r. – **kierownik**;
- PB8. S/WM/4/17 - praca statutowa: *Mechanika ośrodków niejednorodnych z uwzględnieniem efektów termicznych*, realizowana w Politechnice Białostockiej w latach 2017 – 2018 – **wykonawca**;
- PB9. S/WM/1/13 - praca statutowa: *Zagadnienia mechaniki materiałów niejednorodnych i anizotropowych*, realizowana w Politechnice Białostockiej w latach 2013 - 2016 – **wykonawca**;

- PB10. S/WM/1/08 - praca statutowa: *Metody prognozowania zniszczenia materiałów o złożonych właściwościach termiczno-mechanicznych*, realizowana w Politechnice Białostockiej w latach 2008 – 2012 – **wykonawca**;
- PB11. POIG.01.01.02-00-015/08-00 - projekt kluczowy *"Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym"* finansowany ze środków Unii Europejskiej, realizowany w Politechnice Białostockiej w latach 2011 – 2012, jako praca umowna zlecona przez Politechnikę Lubelską, nazwa zadania badawczego:
- *Badania zależności pomiędzy wytrzymałością statyczną oraz wytrzymałością na zginanie, a rodzajem laminatów metalowo-włóknistych typu: metal/kompozyty o osnowie epoksydowej wzmacniane włóknami szklanymi i węglowymi – główny wykonawca zadania;*
  - *Badania zależności pomiędzy wytrzymałością statyczną a rodzajem laminatów metalowo-włóknistych typu: metal/kompozyty o osnowie epoksydowej wzmacniane włóknami szklanymi i węglowymi – główny wykonawca zadania;*
  - *Badania zależności pomiędzy wytrzymałością zmęczeniową a rodzajem materiałów kompozytowych o osnowie epoksydowej wzmacnianych włóknami szklanymi i węglowymi – kierownik zadania;*



### 5.3. Cel naukowy pozostałych osiągnięć badawczych, dyskusja wyników i możliwości ich wykorzystania

W czerwcu 2002r. obroniłem z wynikiem celującym, na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej swoją pracę magisterską pt. *Wytrzymałość zmęczeniowa metali przy nieproporcjonalnym obciążeniu momentem skręcającym i siłą rozciągającą*. W tym samym roku podjąłem też pracę jako asystent w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn na tym Wydziale. W kręgu moich zainteresowań naukowych leżały tematy związane z prognozowaniem trwałości zmęczeniowej i modelowaniem kumulacji uszkodzeń w materiałach konstrukcyjnych. W lipcu 2008 r. przed komisją Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej odbyła się publiczna obrona mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej *Modelowanie kumulacji uszkodzeń wywołanej złożonymi obciążeniami niskocyklowymi*, którą napisałem pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Andrzeja Seweryna. W tym samym roku uzyskałem stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie *mechanika*. Zasadniczym celem mojej pracy było opracowanie i doświadczalna weryfikacja modelu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, który umożliwiłby wyznaczanie trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, poddanych działaniu obciążeń w zakresie małej liczby cykli. W modelu tym bardzo ważne było odpowiednie sformułowanie prawa kumulacji uszkodzeń oraz prawidłowy dobór kryterium pęknięcia i zależności konstytutywnych, biorąc pod uwagę to, że konstrukcja może pracować w warunkach nieproporcjonalnych obciążeń o złożonej trajektorii. Prawo kumulacji uszkodzeń sformułowałem przyrostowo, w postaci zaczerpniętej z mechaniki uszkodzeń. Przyrost zmiennej stanu uszkodzenia uzależniłem od stanu naprężenia (w szczególności od wartości naprężenia normalnego) oraz od przyrostu plastycznego odkształcenia postaciowego na płaszczyźnie fizycznej – w przypadku podejścia odkształceniowego lub przyrostu energii dysypowanej – w przypadku podejścia energetycznego. W pracy stwierdziłem dużą przydatność wielopłaszczyznowego modelu umocnienia materiału zaproponowanego przez Mroza, a zmodyfikowanego przez Garuda, do wyznaczania rozkładów naprężeń lub przemieszczeń. Weryfikacja doświadczalna opracowanego modelu kumulacji uszkodzeń obejmowała zagadnienia wyznaczania trwałości zmęczeniowej wybranych materiałów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń jedno- i dwuosiowych, proporcjonalnych i nieproporcjonalnych. W tym celu wykorzystałem wyniki badań eksperymentalnych (dla stali SAE 1045, L290GA, SNCM 630 oraz aluminium EN AW- 2007). Przeprowadzona analiza dla wymienionych materiałów i różnych sposobów obciążania (naprężeniem, odkształceniem i sposobem mieszanym) wykazały dobrą zgodność wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi.

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora kontynuowałem prace nad modelowaniem kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Ich rezultaty odnaleźć można w publikacjach [D1÷D2] oraz [D11÷D13]. W pracach tych wykazano wyższość kryteriów zmęczeniowych wykorzystujących koncepcję płaszczyzny krytycznej i prawa kumulacji uszkodzeń sformułowanego na bazie mechaniki uszkodzeń nad klasycznymi kryteriami zmęczeniowymi

opartymi na wielkościach makroskopowych, takich jak np. amplitudy, wielkości średnie oraz maksymalne naprężeń i odkształceń. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w modelach mechaniki uszkodzeń należy wykorzystywać anizotropowe zmienne stanu uszkodzenia w postaci np. skalarów związanych z płaszczyzną fizyczną. W pracy [D1] na podstawie obserwacji mechanizmów pęknięcia materiału poddanego działaniu złożonych obciążeń zmęczeniowych przyjęto, że za kumulację uszkodzeń oraz inkubację i rozwój mikropęknięć w warunkach obciążeń niskocyklowych w materiałach polikrystalicznych odpowiedzialne są poślizgi w ziarnach. Na tej podstawie sformułowano odkształceniowe prawo kumulacji uszkodzeń wywołanej odkształceniami plastycznymi, w którym zmienną stanu uszkodzenia uzależniono od naprężeniowej funkcji kumulacji uszkodzeń oraz przyrostu plastycznych odkształceń postaciowych na danej płaszczyźnie fizycznej. Nowa postać funkcji kumulacji uszkodzeń została w tym przypadku powiązana z naprężeniową funkcją pęknięcia, którą zapisano za pomocą warunku maksymalnych naprężeń normalnych. W celu określenia miejsca i kierunku inicjacji pęknięcia rozpatrywano wszystkie płaszczyzny fizyczne na których zachodziła kumulacja uszkodzeń wywołana obciążeniami zmęczeniowymi. Uszkodzenia sumowano niezależnie dla każdej z nich, po czym sprawdzano na której z nich warunek inicjacji pęknięcia został osiągnięty najszybciej. Pozwoliło to na lokalizację pęknięcia. Prezentowany tu algorytm postępowania dla wyznaczania trwałości zmęczeniowej materiału przeznaczony jest dla przypadku jednorodnych pól naprężeń i złożonych trajektorii obciążenia.

W pracy [D11] i [D13] prowadzono badania w zakresie modelowania kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Testowano tu poprawność działania opracowanego algorytmu obliczeniowego pozwalającego na wyznaczanie liczby cykli działania obciążenia do momentu wystąpienia inicjacji pęknięcia. Prezentowany w pracach model obliczeniowy wykorzystuje metodę różnic skończonych i posiada strukturę blokową. W pracach tych wykazano, że w przypadku praktycznych obliczeń inżynierskich trwałości zmęczeniowej materiału przy wykorzystaniu opracowanych zależności obliczeniowych wymagane jest użycie zaawansowanych metod numerycznych, np. metody elementów skończonych oraz związków konstytutywnych prawidłowo opisujących sprężysto-plastyczne zachowanie materiału w warunkach złożonych obciążeń, cyklicznie zmiennych (tak jak jest to w przypadku modelu umocnienia Mroza-Garuda).

W pracy [D2] przedstawiono oryginalny model kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych (wykorzystujący podejście odkształceniowe związane z płaszczyzną fizyczną), który umożliwia prognozowanie trwałości w warunkach złożonych obciążeń niskocyklowych (nawet dla przypadku skomplikowanych ścieżek obciążenia). Opracowany model, tak jak poprzednio składał się z dwóch bloków obliczeniowych. Pierwszy, wiążący historię obciążenia z historią stanu naprężenia i odkształcenia, zawierał związki konstytutywne (m.in. prawo kinematycznego wzmocnienia materiału, wykorzystujące model wielopowierzchniowy Mroza z uwzględnieniem modyfikacji Garuda). Umożliwił on wyznaczenie stanu naprężenia przy zadanym, złożonym stanie odkształcenia (i na odwrót). Drugi blok algorytmu

przeznaczony był do obliczania przyrostu zmiennej stanu uszkodzenia, stąd też zawierał prawo kumulacji uszkodzeń oraz kryterium pęknięcia materiału. Te dwa moduły obliczeniowe połączyła historia stanu naprężenia i odkształcenia materiału, która wynika z obliczeń wykonanych w pierwszym bloku i stanowi podstawowy zbiór danych wejściowych niezbędny do oceny trwałości obliczonej w drugim bloku. Model ten może mieć zastosowanie w praktycznych obliczeniach inżynierskich. W celu weryfikacji opracowanych zależności obliczeniowych przeprowadzono badania doświadczalne na technicznym stopie aluminium EN AW-2007 zarówno w zakresie cyklicznych obciążeń jednoosiowych [D2], jak i obciążeń dwuosiowych (proporcjonalnych i nieproporcjonalnych) [D2, D12]. Wyniki uzyskane w trakcie testów mają duże znaczenie poznawcze i są wykorzystane przez innych badaczy zarówno do formułowania, jak i weryfikacji własnych modeli obliczeniowych.

Opracowany model obliczeniowy kumulacji uszkodzeń, po wprowadzeniu modyfikacji został wykorzystany do:

- prognozowania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych pracujących w warunkach podwyższonej temperatury [M3; PB2; PB7];
- analizy pęknięcia elementów z karami w warunkach złożonych obciążeń monotonicznych [D3];

W pracy [M3], która powstała jako wynik realizacji projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego N501 120536 przedstawiono wyniki badań doświadczalnych prowadzonych na próbkach wykonanych z technicznego stopu aluminium EN AW-2007 oraz lotniczego stopu aluminium EN AW-2024T3. Badania kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych prowadzono zarówno dla obciążeń jednoosiowych: rozciąganie-ściskanie, symetryczne skręcanie, jak też złożonych proporcjonalnych i nieproporcjonalnych zarówno w temperaturze otoczenia, jak i podwyższonej. Prezentowany w pracy algorytm wyznaczania zmienności pól naprężeń i odkształceń wykorzystywany był przeze mnie na dalszych etapach mojej kariery naukowej do rozwiązywania zagadnień związanych z modelowaniem kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Istotnym osiągnięciem naukowym w tym zakresie było: przeprowadzenie analizy wyników uzyskanych w trakcie badań doświadczalnych w zakresie określania parametrów wytrzymałościowych i zmęczeniowych najczęściej wykorzystywanych w technice stopów aluminium; opracowanie zależności obliczeniowych pozwalających na wyznaczenie pól naprężeń i odkształceń oraz ich zmienności w obciążanych elementach konstrukcyjnych; opracowanie modelu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych i jego weryfikacja doświadczalna na technicznym stopie aluminium. Opracowany w trakcie realizacji zadania badawczego model pozwala na analizę stanu uszkodzenia materiału pracującego w zakresie obciążeń sprężysto-plastycznych. Zastosowana w modelu zmienna stanu uszkodzenia nie jest związana z fizyczną definicją uszkodzeń, lecz określa spadek wytrzymałości materiału w danym kierunku, zdefiniowany przez wektor normalny do płaszczyzny fizycznej. Dzięki temu, w miarę wzrostu uszkodzeń spada wartość obciążenia krytycznego wywołującego inicjację pęknięcia w materiale.

Opracowane zależności mogą być wykorzystane do szacowania trwałości zmęczeniowej materiału podczas obliczeń inżynierskich.

W pracy [D3] zajmowano się tematyką pękania elementów z karami obrączkowymi. Wykonano w niej obliczenia kumulacji uszkodzeń powstałych na skutek działania złożonego proporcjonalnego obciążenia monotonicznego (kombinacją siły rozciągającej i momentu skręcającego) dla próbek o pięciu wielkościach promienia zaokrąglenia dna karbu  $r_K=0.5, 2, 4, 8$  oraz 30 mm. Modelowanie wykazało, że największe wartości zmiennej stanu uszkodzenia generowane są dla przypadku czystego skręcania. Wzrost udziału rozciągania w procesie obciążania próbek wywołuje spadek wartości tej zmiennej. W wyniku tego do inicjacji procesu pękania w przypadku skręcania potrzebne są niższe wartości naprężeń niż w przypadku rozciągania. Dokonano tu także lokalizacji miejsca inicjacji pęknięcia dla rozpatrywanych przypadków obciążenia i wielkości karbu obrączkowego.

W pracy [D4] przeprowadzono obliczenia kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych materiałów porowatych np. wykorzystywanych w medycynie do produkcji implantów. Analizę wykonano dla 3 stopni porowatości 26, 33 oraz 41% materiału otrzymanego z proszku stali AISI 316L. W pracy wykazano wyższość nieliniowych modeli kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych przy opisie trwałości spieków porowatych metali. Modele te w porównaniu z modelami liniowymi pozwalają dokładniej opisać spadek wytrzymałości zmęczeniowej materiału w trakcie jego cyklicznego obciążenia.

W temacie trwałości zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych rozważałem również materiały kompozytowe. W pracy [D5] przeprowadzono badania doświadczalne wyznaczania trwałości zmęczeniowej oraz identyfikację mechanizmów pękania materiałów kompozytowych wykorzystywanych w przemyśle lotniczym. Analizowano laminaty nowej generacji metalowo-kompozytowe (FML). Są to laminaty składające się z warstw cienkiej blachy metalowej i kompozytu polimer-włókno ceramiczne lub polimerowe. W pracy badano zdolność nowego materiału hybrydowego do hamowania i blokowania rozwoju pęknięć przy cyklicznym obciążeniu. Wykazano bardzo dobrą odporność nowo wytworzonego laminatu konstrukcyjnego na obciążenia zmęczeniowe i udarowe. Prace w tym zakresie kontynuowano także w ramach zadań projektu badawczego [PB11] wykonanych na zlecenie Politechniki Lubelskiej, we współpracy z zespołem prof. Surowskiej. Wykonano w nich szereg badań zmęczeniowych opracowanych przez nich nowych materiałów kompozytowych przygotowanych zarówno na bazie włókna szklanego i węglowego, jak i kompozytów metalowo-włóknistych (tytanowych i aluminiowych). Badania zmęczeniowe przeprowadzono w temperaturze pokojowej przy wymuszeniu kinematycznym dla 17 różnych laminatów kompozytowych. W trakcie trwania badań dodatkowo przy pomocy szybkiej kamery (600 klatek/s) dokonywano rejestracji części pomiarowej próbki w celu zbadania prędkości propagującej szczeliny. Do badań założono poziome obciążenia odpowiadające odpowiednio 75, 80, 85 oraz 95% wartości maksymalnej siły z przebiegu monotonicznego dla danego typu próbki. Obszerny raport z wykonanych badań przekazano Zleceniodawcy celem wnikliwej analizy uzyskanych rezultatów badań.

W pracy [D6] zajmowano się szacowaniem trwałości zmęczeniowej nie materiałów jak czyniono to dotychczas, a elementów konstrukcyjnych. Rozważaniom poddano koła zębate przekładni mechatronicznych. Zaprojektowano tu i wykonano stanowisko badawcze (PP7), które pozwala na określanie trwałości zmęczeniowej zębów kół zębatach (wykonywanych na jednej parze tych kół). Przetestowane stanowisko posłużyło do przeprowadzenia badań doświadczalnych na walcowych kołach o zębach prostych i skośnych, wykonanych ze stopów aluminium EN AW-2017A i EN AW-7057 oraz stali 40HM.

Opracowane na potrzeby realizacji pracy [D6] stanowisko badawcze stało się tematem zgłoszenia patentowego [PP7]. Przy jego projektowaniu starano się jak najdokładniej odwzorować warunki eksploatacyjne i techniczne badanej pary kół zębatach. Prezentowane w pracy [D6] stanowisko badawcze składało się z podstawy mocowanej do uchwytu hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej (np. MTS 322 Test Frame), która umożliwia zadawanie programowanego przebiegu obciążenia. Do podstawy za pomocą odpowiednio profilowanych kołnierzy mocowany był korpus przekładni, wewnątrz której znajdowała się badana para kół zębatach. Wałek zdawczy przekładni mocowano za pomocą sprzęgła z momentomierzem odpowiedzialnym za zbieranie danych w czasie trwania testu. Wał napędowy przekładni łączono mechanizmem korbowym z drugim uchwytem maszyny wytrzymałościowej zamykając w ten sposób łańcuch kinematyczny obciążenia. W prezentowanym rozwiązaniu w celu zadawania obciążenia, zastosowano mechanizm korbowy, który zamienia zaprogramowany ruch postępowo-zwrotny siłownika wymuszającego maszyny wytrzymałościowej na ruch obrotowy wałka napędowego badanej przekładni. Moment skracający na wałku zdawczym rejestrowany był w czasie rzeczywistym za pomocą tensometrycznego czujnika momentu obrotowego. Układ pomiarowy umożliwił akwizycję wartości sygnału pomiarowego czujnika momentu oraz wartość odpowiadającego mu obciążenia wymuszającego. Opracowane stanowisko umożliwia określanie trwałości zmęczeniowej kół zębatach przekładni z odwzorowaniem rzeczywistych warunków pracy. Ponadto jedna para współpracujących kół zębatach pozwala wyznaczyć całą charakterystykę zmęczeniową przekładni. Każdy z punktów krzywej zmęczeniowej wyznaczany jest na jednej parze zębów współpracujących lub maksymalnie dwóch w przypadku gdy dwie pary zębów zazębiają się w przyporze. Po zakończeniu badania na danym poziomie obciążenia obraca się wał przekładni, tak aby w przyporze znalazła się kolejna nieuszkodzona para zębów, po czym proces cyklicznego obciążania się powtarza. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest obniżenie kosztów testów zmęczeniowych poprzez zmniejszenie liczby próbek badawczych (przekładni). Wykonane na opracowanym stanowisku badania dostarczyły informacji na temat mechanizmów inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych oraz mechanizmów zużycia w zębach przekładni zębatach.

Zdobyta w trakcie realizacji tych badań wiedza pozwoliła na opracowanie skuteczniejszej metody wyznaczania trwałości zmęczeniowej zębów kół zębatach przekładni. W zgłoszeniu patentowym [PP8] zaproponowano stanowisko, w którym wyeliminowano mechanizm korbowy wykorzystywany do zadawania obciążenia na koło czynne przekładni zębatej. W

nowym stanowisku badawczym do określania trwałości zmęczeniowej zębów przekładni wykorzystano programowalny hamulec elektromechaniczny, a do zadawania momentu obrotowego hydrauliczny siłownik liniowo-skrotny o zakresie obrotu  $\pm 90^\circ$ . W układzie kinematycznym stanowiska zastosowano dodatkową parę kół zębatych o przełożeniu 1:1 – zamykającą układ przeniesienia napędu. Próbka badawcza (koło zębate) w trakcie testów poddawana jest oscylacjom kątowym w zakresie kąta wychylenia  $\pm 5^\circ$ , przy zadanym poziomie obciążenia. Charakter otrzymany krzywej trwałości zmęczeniowej materiału kół zębatych uwzględnia w tym przypadku podatność elementów współpracujących przekładni poprzez podatność wałów, łożysk, wpustów, sztywność korpusu.

Istotnym osiągnięciem w tym zakresie było: opracowanie założeń i wytycznych projektowych dla konstrukcji nowych stanowisk badawczych do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej kół zębatych przekładni mechatronicznych; zaprojektowanie i wykonanie stanowisk badawczych; przeprowadzenie serii prób i testów dzięki którym wyeliminowano pojawiające się niedomagania; przeprowadzenie badań doświadczalnych wyznaczenia trwałości zmęczeniowej kół zębatych przekładni; opracowanie metody wyznaczenia krzywej trwałości zmęczeniowej zębów kół przekładni na wykonanych stanowiskach badawczych. Opracowana w trakcie realizacji zadania badawczego metoda umożliwiła wyznaczenie całej krzywej trwałości zmęczeniowej zębów kół przekładni na jednej parze kół (jedna próbka). Ponadto w obliczeniach trwałości zmęczeniowej kół zębatych przekładni uwzględnia się podatność wszystkich jej elementów. Opracowane stanowiska badawcze mogą stanowić cenne wyposażenie laboratoriów firm produkujących przekładnie do zastosowań mechatronicznych.

Kolejnym etapem mojej kariery naukowej było nawiązanie współpracy z firmą Masterpress S.A. – światowego lidera w produkcji etykiet termokurczliwych typu shrink sleeve. Rezultaty moich działań w tym zakresie odnaleźć można z zakładzie produkcyjnym zlokalizowanym w Białymstoku przy ulicy Jacka Kuronia 4, gdzie funkcjonują zaprojektowane przeze mnie innowacyjne i unikatowe rozwiązania maszyn i urządzeń przemysłu poligraficznego. Firma umożliwiła mi tworzenie kreatywnych projektów technicznych oraz ich weryfikację w środowisku przemysłowym. Do najważniejszych wytworzonych przeze mnie konstrukcji zaliczyć tu można:

- automatycznie sterowaną maszynę do wykrawania etykiet moletowanych z autopasowaniem wykrojnika;
- urządzenie do nanoszenia kleju w sposób ciągły na łączony rękaw folii termokurczliwej;
- stanowisko do kontroli tulei drukowych wykorzystywanych przy druku Flexograficznym;
- system podwieszanego transportu wałków wykrojnikowych;
- urządzenie do suszenia farb wodnorozcieńczalnych nakładanych w sposób ciągły na maszynach drukujących;

- stoły splotowe do odbioru etykiet moletowanych – umożliwiające ich konfekcjonowanie;
- konstrukcje wsporcze systemów wizyjnych do kontroli jakości druku na maszynach drukowych;
- zespół perforujący umożliwiający wykonywanie etykiety z otworami odpowietrzającymi;
- urządzenie do czyszczenia zabrudzonych etykiet;
- urządzenie do badania ścieralności wykonanego na etykiecie zadruku;
- system przewracania materiału w trakcie procesu jego drukowania;
- urządzenie do odbioru azuru powstałego w trakcie cięcia materiału na tory;
- modyfikacje konstrukcji parku maszynowego optymalizujące procesy produkcyjne w zakresie poszerzenia ich charakterystyk, zwiększenia wydajności czy zapewnienia większej elastyczności produkcyjnej i kontroli procesu.

Najważniejszym moim osiągnięciem związanym ze współpracą z firmą Masterpress S.A. było utworzenie w zakładzie działu *Budowy Maszyn*, w którym pełnię funkcję lidera zespołu projektowego i specjalisty do spraw badań i rozwoju. Między innymi dzięki moim staraniom firma aplikowała do NCBR z wnioskiem o realizację pracy B+R pt. „*Kompleksowa linia technologiczna do aplikacji i obkurczania etykiet termokurczliwych w nowatorskiej technologii Masterpress SA*” POIR.01.01.01-00-0341/15. W ramach tego projektu opracowana została kompleksowa linia technologiczna do aplikacji i obkurczania etykiet termokurczliwych na opakowaniach typu shrink sleeve, która działa w oparciu o nowatorską technologię wypracowaną w wyniku prac badawczo - rozwojowych.

W ramach prowadzonych przeze mnie badań przemysłowych udało się wypracować innowacyjne rozwiązania, które stały się tematem zgłoszeń patentowych [PP5 – PP6] oraz udzielonych patentów [PP9, PP1 ÷ PP14]. Ponadto prowadzone działania w tym zakresie umożliwiły stworzenie prac naukowych, które opublikowano w czasopiśmie indeksowanych w bazie JCR [D7-D8]. W pracy [D7] analizowano wpływ zadruku folii termokurczliwej na przebieg procesu jej obkurczania, w którym materiał na skutek relaksacji łańcuchów polimerowych przybiera ostateczny kształt pojemnika. Przeprowadzone badania wykazały, że właściwości materiałowe takie jak moduł Younga ( $E$ ), granica plastyczności ( $\sigma_Y$ ), wytrzymałość na zerwanie ( $\sigma_M$ ) czy odkształcenie przy zerwaniu ( $\varepsilon_M$ ) w przypadku materiałów na etykiety termokurczliwe zależne są od parametrów procesu technologicznego związanego z otrzymywaniem takich etykiet. Liczba kolorów zadruku, naciągi maszyny decydują o postaci przebiegu krzywej rozciągania. Wraz ze wzrostem ilości koloru zadruku (otrzymywanego w technologii FLEXO) dla analizowanych rodzajów folii, wszystkie parametry materiałowe za wyjątkiem odkształcenia przy zerwaniu ulegają obniżeniu. Ponadto zauważono, że wielkość skurczu ukierunkowanego folii w początkowej fazie grzania również zależna jest od ilości kolorów zadruku, a tym samym od parametrów technologicznych związanych z wytwarzaniem etykiety. Wraz ze wzrostem temperatury obkurczania różnice te

zmniejszają się. Stwierdzono, że w przypadku obkurczania wielokolorowej etykiety na opakowaniu należy stosować wyższe temperatury grzania.

Jakość procesu obkurczenia etykiety termokurczliwej na opakowaniu oceniana jest na dzień dzisiejszy poprzez oględziny zewnętrzne pojemnika z nałożoną etykietą. Sprawdzane jest przyleganie etykiety do ścianek pojemnika, oceniana jest siła zacisku poprzez próbę przesunięcia bądź obrócenia etykiety na pojemniku. Taka weryfikacja nie jest obiektywna i nie daje jednoznacznych wyników. Z tych powodów w pracy [D8] opracowano ilościową (a nie tylko jakościową) metodę oceny procesu skurczu rękawa shrink sleeve. Dzięki temu istnieje możliwość zbadania siły zacisku etykiety termokurczliwej na opakowaniu. Uzyskano to poprzez pomiar odkształceń obwodowych  $\varepsilon_1$  i południkowych  $\varepsilon_2$  na ściankach pojemnika. Znajomość tych odkształceń pozwala na określenie naprężeń  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  z nimi związanych, a wynikających z prawa Hooke'a dla płaskiego stanu naprężeń. To właśnie wspomniane naprężenia umożliwią wnioskowanie o sile zacisku folii. Do pomiaru odkształceń wykorzystano metodę tensometrii elektrooporowej. Badając naprężenia dla różnych konfiguracji dysz np. parowych oraz różnych ich kształtów można ustalić najbardziej optymalne rozwiązanie tj. takie, przy którym zacisk folii na różnych wysokościach pojemnika będzie zbliżony. Badania z użyciem prezentowanej metody umożliwiają rejestrację i analizę odkształceń (a zatem i naprężeń) w sposób ciągły. Możliwym jest zatem oszacowanie zmian wartości siły zacisku folii w czasie od chwili uderzenia pary do chwili ostygnięcia.

W kręgu moich zainteresowań leży również tematyka Odnawialnych Źródeł Energii. W tym zakresie udało się opracować 3 konstrukcje siłowni wiatrowych z pionową osią obrotu oraz mechanizm stabilizujący pracę wolnoobrotowego generatora bezrdzeniowego. W pracy [D10] oraz w zadaniu badawczym „*Opracowanie konstrukcji i wdrożenie do produkcji siłowni wiatrowej o pionowej osi obrotu*” realizowanym w ramach projektu: *Transferu Technologii do Przemysłu* WND-POKL.08.02.01-20-103/12 w Politechnice Białostockiej zaprojektowano, wykonano i przebadano konstrukcję aerogeneratora o mocy 3kW opracowaną na podstawie rozwiązania turbiny Pawlaka. Zastosowano tu unikatowy mechanizm regulowanych kierownic, który zwiększa sprawność turbiny, bez zwiększania wielkości rotora. Konstrukcja mojego pomysłu została zainstalowana na terenie ośrodka wypoczynkowego Politechniki Białostockiej w miejscowości Hołny Majera i stała się obiektem kolejnych badań naukowych prowadzonych w ramach prac doktorskich realizowanych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej. Kolejne rozwiązania siłowni wiatrowych o pionowej osi obrotu mojego autorstwa to turbiny z mechanicznie modulowaną mocą [PP1]. Innowacyjność tych konstrukcji stanowi możliwość modulacji mocy generowanej w danych warunkach pogodowych. Realizowane jest to tu poprzez zmianę parametrów koła wiatrowego. Zmianę średnicy koła zakreślanego przez poruszający się wirnik uzyskano dzięki mechanizmowi śrubowemu umieszczonemu we wnętrzu rotora. Konstrukcję wg wynalazku [PP1] zainstalowano na Szpitalu Powiatowym w Głubczycach. Ponadto w tej tematyce byłem współautorem zgłoszenia patentowego [PP3] w którym



zapropozowano nowy system łożyskowania tarczy bezrdzeniowego generatora wolnoobrotowego, zapewniającego utrzymywanie minimalnego momentu zaczepowego.

W swojej dotychczasowej pracy naukowej zajmowałem się również tematyką połączeń spawanych. W pracy [D9] analizowano możliwość wykorzystania spawania mikroplazmowego do łączenia cienkich blach tytanowych Grade 5 (6Al-4V). Stop ten ze względu na swoje dobre właściwości wytrzymałościowe (podobnie jak stop aluminium EN AW 2024T3) jest używany w przemyśle lotniczym i medycznym, gdzie wymagane są: duża wytrzymałość odniesiona do niskiej masy oraz korzystne właściwości korozyjne. Analizowano 2 typy złączy spawanych (złącze doczołowe – Type 2 oraz złącze zakładkowe Type 3) uzyskane przy wybranych parametrach spawania mikroplazmowego, dla których określono parametry wytrzymałościowe i zmęczeniowe. Porównano je z wytrzymałością materiału rodzimego (bez spoiny próbka Type 1). Ocenę jakości połączenia dokonano na podstawie monotonicznej próby rozciągania oraz badań zmęczeniowych w zakresie jednoosiowego rozciągania przy wymuszeniu siłowym. Przeprowadzono także analizę mikroskopową wykonanych złączy spawanych oraz uzyskanych w trakcie badań przelomów. Ponadto w pracy określono rozkłady odkształceń w obciążanych typach próbek, co pozwoliło zbadać wpływ wielkości strefy wpływu ciepła na wytrzymałość złączy poddanych działaniu obciążeń rozciągających. Na podstawie uzyskanych w trakcie próby rozciągania pól odkształceń stwierdzono w jakim stopniu proces spawania wpływa na właściwości materiału i wielkość strefy plastyczności. W przypadku próbki bez spoiny (Type 1) materiał w trakcie rozciągania zachowuje jednorodny rozkład odkształceń, aż do momentu osiągnięcia granicy wytrzymałości, przy której pojawiają się pierwsze pasma poślizgu równomiernie rozłożone na całej bazie pomiarowej próbki. W przypadku złącza doczołowego (próbka Type 2) już na samym początku procesu obciążania wyraźnie widać wpływ strefy ciepła złącza na rozkłady odkształceń w próbce. W tych strefach obserwuje się znaczną koncentrację naprężeń, co skutkuje obniżeniem ciągliwości materiału. Wyraźniejszy wpływ procesu spawania na rozkłady odkształceń obserwowane są dla próbki (Type 3). W tym przypadku większe odkształcenia zlokalizowane są w strefie wpływu ciepła po stronie uchwytu maszyny wytrzymałościowej.

W pracy [D9] zamieszczono również poklatkowe zestawienie rozkładów odkształceń, które obrazuje przebieg procesu pękania. Dla próbki (Type 1) widać równomierne rozrastanie się strefy plastyczności wywołanej pasmami poślizgów. W przypadku próbki (Type 2) również widoczne są pasma poślizgów, które symetrycznie względem złącza spawanego powiększają strefę plastyczności wywołaną narastającym obciążeniem. Odmienny charakter pękania obserwuje się dla próbki (Type 3). W tym przypadku największe odkształcenia skoncentrowane są wokół strefy wpływu ciepła po stronie pojedynczego elementu połączenia zakładkowego. Strefa odkształceń plastycznych jest prawie równolegle zorientowana do kierunku spawania. Wytrzymałość doraźna złącza jest na poziomie wytrzymałości rodzimego materiału. Zastosowany proces spawania wpływa tu w sposób znaczący na zmianę wydłużenia próbki przy zerwaniu. Obserwuje się niemal 4-krotny spadek wydłużenia dla

próbek (Type 2) oraz 6-krotny dla próbek (Type 3). Związane to jest ze zmianami jakie zachodzą w strukturze materiału w trakcie procesu spawania. Ze względu na znaczną kruchość złącza spawanego uzyskane tą metodą połączenia nie powinny być stosowane w przypadku występowania dużych obciążeń uderowych. W podsumowaniu pracy stwierdzono, że metodę spawania mikroplazmowego cienkich arkuszy stopu tytanu Grade 5 (6Al-4V) można z powodzeniem wykorzystywać w technice łączenia tego materiału.

Osiągnięciem w tej tematyce było: zaprojektowanie i wykonanie próbek badawczych tytanowych złącz spawanych oraz przeprowadzenie badań doświadczalnych dotyczących możliwości wykorzystania techniki spawania mikroplazmowego (laserowego) do łączenia arkuszy cienkich blach tytanowych Grade 5 (6Al-4V) – wykorzystywanych w przemyśle lotniczym; określenie rozkładów odkształceń w obciążanych typach próbek tytanowych złącz spawanych, co pozwoliło zbadać wpływ wielkości strefy wpływu ciepła na wytrzymałość złączy poddanych działaniu siły rozciągającej.

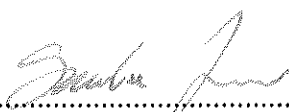
Moje zainteresowania naukowe skupiają się wokół szacowania trwałości zmęczeniowej materiałów i elementów konstrukcyjnych. Dlatego też mój dorobek naukowy wzbogacają liczne prace wykonywane na zlecenie podmiotów zewnętrznych. Przykładem takich działań mogą być prace zlecone. W ich tematach zawarto główny ich cel. Ze względu na podpisane klauzule poufności nie będą tu szczegółowo opisywane.

Poza głównym nurtem moich zainteresowań omawianych w jednotematycznym cyklu publikacji moja działalność naukowa obejmował także szereg innych zagadnień. Najważniejsze osiągnięcia z tego zakresu wyszczególnione są w moim dorobku.

**Tab. 1.** Wykaz osiągnięć naukowych przed i po uzyskaniu stopnia naukowego dr nauk technicznych

	<b>Łącznie</b>	<b>Przed doktoratem</b>	<b>Po doktoracie</b>
<b>Sumaryczny IF 5 letni</b>	<b>33,328</b>	<b>1,832</b>	<b>31,496</b>
<b>Publikacje ogółem</b>	25	6	19
Publikacje z listy A MNiSW	16	1	15
Publikacje z listy B MNiSW	4	0	4
Publikacje spoza listy MNiSW	5	5	0
<b>Monografie</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
Rozdziały w monografiach	2	1	1
<b>Publikacje w materiałach konferencyjnych</b>	<b>38</b>	<b>13</b>	<b>25</b>
Publikacje w materiałach konferencyjnych w języku angielskim	12	0	12
Publikacje w materiałach konferencyjnych w języku polskim	26	13	13
<b>Udział w konferencjach</b>	<b>29</b>	<b>10</b>	<b>19</b>
Konferencje krajowe	20	9	11
Konferencje międzynarodowe	9	1	8
<b>Projekty badawcze ogółem (kierowanie)</b>	<b>11(3)</b>	<b>0(0)</b>	<b>11(3)</b>
<b>Prace zlecone przez podmioty zewnętrzne</b>	<b>34</b>	<b>0</b>	<b>34</b>
<b>Zgłoszenia patentowe</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>11</b>
<b>Udzielone patenty + decyzja pozytywna przygotowanie do ochrony</b>	<b>4+2</b>	<b>0</b>	<b>4+2</b>

14.03.2019r.  
.....  
Data

  
.....  
Podpis kandydata