

Arkadiusz Bednarz - Autoreferat

Załącznik nr III do wniosku

AUTOREFERAT

Dr inż. Arkadiusz Stefan Bednarz

Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Rzeszów, 2025

Spis treści

1. Imię i nazwisko.....	4
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	4
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.....	5
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.....	5
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	6
4.2. Opis monografii naukowej.....	6
4.3. Artykuły naukowe wchodzące w skład cyklu publikacji i jego charakterystyka 30	
4.4. Charakterystyka oryginalnych osiągnięć projektowe	40
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.....	43
5.1. Współpraca z innymi uczelniami lub instytucjami naukowymi o zasięgu międzynarodowym.....	43
5.1.1. Lehigh University.....	43
5.1.2. Sudwestfalen Fachhochschule	43
5.2.3. University of Sao Paulo.....	44
5.2.4. Sankt Petersburg State University	44
5.2. Współpraca z innymi uczelniami lub instytucjami naukowymi o zasięgu krajowym.	44
5.2.1. Politechnika Łódzka.....	44
5.2.2. Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Instytut Lotnictwa	45
5.2.3. Politechnika Świętokrzyska.....	47
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.....	48
6.1. Działalność dydaktyczna	48
6.2. Działalność organizacyjna i popularyzująca naukę.	49

W okresie 2014 do 2025 uczestniczyłem w następujących konferencjach:.....	51
7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.....	53
7.1. Nagrody i wyróżnienia.....	53
7.2. Projekty.....	53
7.3. Staże, studia podyplomowe, udział w szkoleniach lub warsztatach.....	60
7.4. Dodatkowe doświadczenia zawodowe.....	62

1. Imię i nazwisko.

Arkadiusz Stefan Bednarz

Baza	Identyfiaktor
ORCID	0000-0002-3611-7513 https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-3611-7513
Scopus	56856759900 https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56856759900
ResearcherID (WoS)	F-7715-2018 https://www.webofscience.com/wos/author/record/F-7715-2018

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

stopień doktora	Rok uzyskania: 2019 podmiot nadający: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Dziedzina: Nauki inżynieryjno-techniczne Dyscyplina: Inżynieria Mechaniczna Tytuł rozprawy doktorskiej: Numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz trwałości zmęczeniowej łopatek z uszkodzeniami w zakresie drgań rezonansowych Promotor: dr hab. inż. Lucjan Witek, prof. PRz Promotor pomocniczy: dr inż. Łukasz Święch Recenzenci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda – Politechnika Opolska dr hab. inż. Andrzej Leski – Instytut Lotnictwa
tytuł magistra	Rok uzyskania: 2014 podmiot nadający: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Kierunek studiów: Lotnictwo i Kosmonautyka Tytuł pracy magisterskiej: Analiza wytrzymałościowa łopatki sprężarki silnika turbinowego Promotor: dr hab. inż. Lucjan Witek, prof. PRz
tytuł inżyniera	Rok uzyskania: 2016 podmiot nadający: Uniwersytet Rzeszowski Kierunek studiów: Mechatronika

Tytuł pracy inżynierskiej: Zaprojektowanie i wykonanie nagrywarki płyt winylowych

Promotor: prof. dr hab. inż. Anna Koziorowska

tytuł **inżyniera**

Rok uzyskania: 2013

podmiot nadający: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Kierunek studiów: Lotnictwo i Kosmonautyka

Tytuł pracy inżynierskiej: Wykonanie modelu obliczeniowego dla silnika turbinowego z dwiema komorami spalania

Promotor: prof. dr hab. inż. Marek Orkisz

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

2019 – nadal Adiunkt w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych, Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej (wcześniej Katedra Samolotów i Silników Lotniczych), Politechnika Rzeszowska

2014 – 2019 Asystent w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych, Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej (wcześniej Katedra Samolotów i Silników Lotniczych), Politechnika Rzeszowska

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Osiągnięciami naukowymi, stanowiącymi znaczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna, o których mowa w art. 219 ust. 1. pkt 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r., są:

- **monografia naukowa**, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2a ustawy oraz
- **cykl powiązanych tematycznie 9 artykułów naukowych**, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy oraz
- **1 oryginalne osiągnięcia projektowe**, konstrukcyjne, technologiczne zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2c ustawy.

Indywidualny wkład w powstanie dzieł współautorskich scharakteryzowano w załącznikach do przywołanych przy omawianiu publikacji. Realizację projektu potwierdzono mailami zawartymi w załącznikach.

W ogólności, osiągnięcia naukowe przyjmują wspólną nazwę: **Ocena wpływu warunków pracy, geometrii i technologii wykonania na wytrzymałość zmęczeniową sprężarki z silnika lotniczego.**

4.2. Opis monografii naukowej

Autorska monografia habilitacyjna pt.: „**Wpływ warunków pracy i technologii wykonania na wytrzymałość zmęczeniową łopatek sprężarki osiowej**” (wyd. I, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, ss. 233, ISBN: 978-83-7934-814-5 - załącznik 5.1). ukazuje wpływ warunków pracy i technologii wykonania na wytrzymałość zmęczeniową wirnika sprężarki osiowej z silnika lotniczego. Omawiane zjawiska i tematy wywodzą się z kilku dziedzin nauki, przez to przygotowane opracowanie miało charakter interdyscyplinarny.

Głównym celem naukowym rozprawy habilitacyjnej była ocena szeregu czynników wpływających na wytrzymałość i trwałość łopatki sprężarki osiowej z silnika lotniczego. Jako cele szczegółowe wyróżniono:

- określenie wpływu temperatury na właściwości zmęczeniowe stopu martenzytycznego w kontekście obliczeń zmęczeniowych metodą lokalnego odkształcenia – ϵ -N;
- zweryfikowanie wpływ temperatury pracy na analityczne modele zmęczeniowego ϵ -N;
- porównanie danych zmęczeniowych analitycznych i eksperymentalnych;
- wykorzystanie narzędzi inżynierii odwrotnej do budowy modelu geometrycznego łopatki;

- przeprowadzenie wstępnej weryfikacji wytrzymałości i deformacji łopatki przy użyciu metod analitycznych;
- przeprowadzenie numerycznej oceny wpływu wirowania, temperatury i obciążeń aerodynamicznych na stan naprężenia i trwałość zmęczeniową łopatki sprężarki (z użyciem metody elementów skończonych – MES);
- określenie wpływu obróbki powierzchniowej na uplastycznienie powierzchni roboczych łopatki i uzyskane naprężenie szczątkowe;
- zbadanie wpływu naprężenia szczątkowego na trwałość zmęczeniową;
- zbudowanie model ortotropowy łopatki i przeprowadzenie numerycznej weryfikacji stanu naprężeń w łopatce wykonanej metodą druku 3D (SLM).

Ponadto jako cel dalszoplanowy przyjęto usystematyzowanie i zestawienie wybranych aspektów technologiczno-mechanicznych, wpływających na trwałość i wytrzymałość łopatek. Zidentyfikowano brak syntetycznego opracowania, które jasno i szczegółowo ukazywałoby równoległe wszystkie wspomniane zagadnienia wytrzymałości wirników z silników lotniczych.

W przeglądzie literatury i cytowanych pozycjach, przedstawionych w rozdziałach, wykazano istotne luki naukowe i poznawcze, których wypełnienie stanowiło cel powstania monografii habilitacyjnej. Opracowanie to mogło posłużyć jako podręcznik naukowy, traktujący o obliczeniach wytrzymałościowych i trwałościowych łopatek silników lotniczych.

Mając na uwadze wspomniane czynniki naukowo-technologiczne związane z silnikami lotniczymi, postanowiono zestawić wybrane aspekty w omawianej publikacji, aby umożliwić ocenę ich wpływu na proces projektowania i samą wytrzymałość wirników, a przez to i wytrzymałość całego silnika. Z uwagi na złożoność omawianych zagadnień wytypowano następujące tematy:

- wpływ technologii wykonania ze szczególnym uwzględnieniem obróbki powierzchniowej (rozmiar ziaren, grubość warstwy uplastycznej i naprężenie wstępne);
- wpływ modelowania materiału w analizach numerycznych (izo- i ortotropowy w kontekście druku 3D metodą SLM);
- wpływ obciążeń aerodynamicznych z uwzględnieniem ich wpływu na trwałość zmęczeniową;
- stan rezonansu w łopatkach wirników jako narzędzie do weryfikacji modeli;
- wpływ temperatury na właściwości zmęczeniowe materiału i korelacja tego wpływu z warunkami pracy silnika lotniczego.

W przypadku oceny wpływu modelowania materiału ukazano różnice w deformacji i lokalizacji maksymalnych naprężeń, będących konsekwencją uwzględnienia zmiany kierunku druku i wykorzystania modelu ortotropowego materiału.

W ramach prezentowanej monografii habilitacyjnej zrealizowałem kompleksowy program badawczy, obejmujący następujące etapy:

- dokonałem przeglądu literatury i stanu wiedzy w zakresie trwałości zmęczeniowej komponentów lotniczych;

- przeprowadziłem badania materiałowe, w tym:
 - wytypowałem materiał do badań eksperymentalnych;
 - zrealizowałem normatywne próby rozciągania z uwzględnieniem wpływu temperatury;
 - opracowałem analityczne modele zmęczeniowe uwzględniające temperaturę próbki;
 - wykonałem eksperymenty z zakresu trwałości zmęczeniowej;
 - zaimplementowałem kod do niskocyklowych obliczeń zmęczeniowych i przeprowadziłem jego walidację;
- zbudowałem model geometryczny łopatki sprężarki osiowej, wykorzystując:
 - oprogramowanie VISTA AFD;
 - przekroje rzeczywistego obiektu;
 - skanowanie 3D;
- wykonałem obliczenia analityczne, w tym:
 - wyznaczyłem naprężenia normalne od rozciągania metodami analitycznymi;
 - przeprowadziłem ocenę uzyskanych wyników;
- przeanalizowałem wpływ poszczególnych obciążeń na stan naprężeń w łopatkę, uwzględniając:
 - siły bezwładności;
 - obciążenia aerodynamiczne;
 - obciążenia termiczne;
 - ryzyko rezonansu;
 - złożony stan obciążeń;
- przeprowadziłem obliczenia zmęczeniowe, obejmujące:
 - porównanie wyników eksperymentalnych dla stanu rezonansu;
 - określenie poziomu naprężeń i korelującej z nimi trwałości zmęczeniowej;
 - szacowanie trwałości w zależności od stanu obciążenia;
- zbadałem wpływ obróbki powierzchniowej na trwałość, poprzez:
 - eksperymentalną ocenę naprężeń szczątkowych;
 - analizę poziomu uplastycznienia po kulowaniu;
 - ocenę wpływu naprężeń szczątkowych na trwałość;
- dokonałem oceny możliwości wykorzystania druku 3D w produkcji łopatek, w tym:
 - przeanalizowałem techniki modelowania materiałów;
 - opracowałem model materiału ortotropowego;
 - oceniłem wpływ kierunku przyrostowego na stan naprężeń i deformację łopatki.

Obiektem badawczym była łopatka sprężarki osiowej z silnika lotniczego. Ze względu na brak dostępu do pełnych danych technicznych (model silnika, materiał, geometria, warunki pracy, czas eksploatacji), przyjęto założenia zapewniające odpowiedni poziom podobieństwa.

Monografię podzielono na rozdziały odpowiadające poszczególnym etapom badań. W rozdziale drugim zawarto szczegółowy opis stanu wiedzy, uwzględniając aspekty

bezpieczeństwa lotniczego oraz incydenty wynikające ze zmęczenia materiału. Opiszano również zagadnienia przepływowo, technologiczne oraz związane z drukiem 3D.

W ramach prac przygotowawczych przeprowadzono badania literaturowe i wykazano istotne luki badawcze, powiązane z omawianymi tematami. Ukazany w rozdziale 2 przegląd literatury wskazuje na istotne luki badawcze w zakresie projektowania i analizy trwałości komponentów silników lotniczych, których uzupełnienie stanowiło główny cel rozprawy habilitacyjnej. Publikacja ta może pełnić funkcję opracowania naukowego, dotyczącego obliczeń wytrzymałościowych i trwałościowych łopatek sprężarek, uwzględniając zarówno aspekty materiałowe, jak i technologiczne.

W kontekście rozwoju maszyn przepływowych szczególne znaczenie mają nowoczesne technologie wytwarzania, umożliwiające realizację złożonych geometrii sprężarek i poprawę ich parametrów aerodynamicznych. Wśród nich wyróżnia się druk 3D – zwłaszcza metodą SLM, która otwiera nowe możliwości projektowe i produkcyjne, pozwalając na redukcję masy komponentów oraz poprawę ich właściwości mechanicznych.

Złożoność procesu projektowania sprężarek wymaga uwzględnienia wielu wzajemnie powiązanych czynników, takich jak: wpływ technologii wykonania (w tym obróbki powierzchniowej), modelowania materiału w analizach numerycznych (izo i ortotropowego w kontekście druku SLM), obciążenia aerodynamiczne, rezonans łopatek oraz wpływ temperatury na właściwości zmęczeniowe materiału. W literaturze brakuje kompleksowych analiz korelujących zmienne termiczne z rzeczywistym stanem obciążenia łopatek, co utrudnia ocenę ich trwałości w warunkach eksploatacyjnych.

Dodatkowo, niewystarczająco rozpoznany pozostaje wpływ naprężeń szczątkowych po kulowaniu w zestawieniu z warunkami pracy i temperaturą, co stanowi kolejną lukę badawczą. Podobnie, niepełna jest wiedza na temat stosowalności modelu ortotropowego dla materiałów wytwarzanych metodą SLM, szczególnie w kontekście ich wytrzymałości i zachowania pod obciążeniem. Zidentyfikowane braki w aktualnym stanie wiedzy uzasadniły potrzebę przeprowadzenia pogłębionych badań, których wyniki zostały przedstawione w omawianej monografii.

Przed przystąpieniem do obliczeń i analiz konkretnego obiektu badawczego, przeprowadzono szereg eksperymentów, których celem było określenie wytrzymałościowych właściwości materiałowych dla stopu EI961 oraz przygotowanie danych zastępczych (z uwagi na ograniczenia w dostępności do próbek z tego stopu). Jako materiał o zbliżonych właściwościach mechanicznych wytypowano stal martenzytyczną AISI420. Dla wspomnianej stali przeprowadzono szereg prób statycznego rozciągania (w różnych warunkach temperaturowych) i określono w ten sposób korelację pomiędzy danymi materiałowymi a właściwościami w potencjalnych warunkach pracy. Zebrane dane zestawiono w tabeli 1.

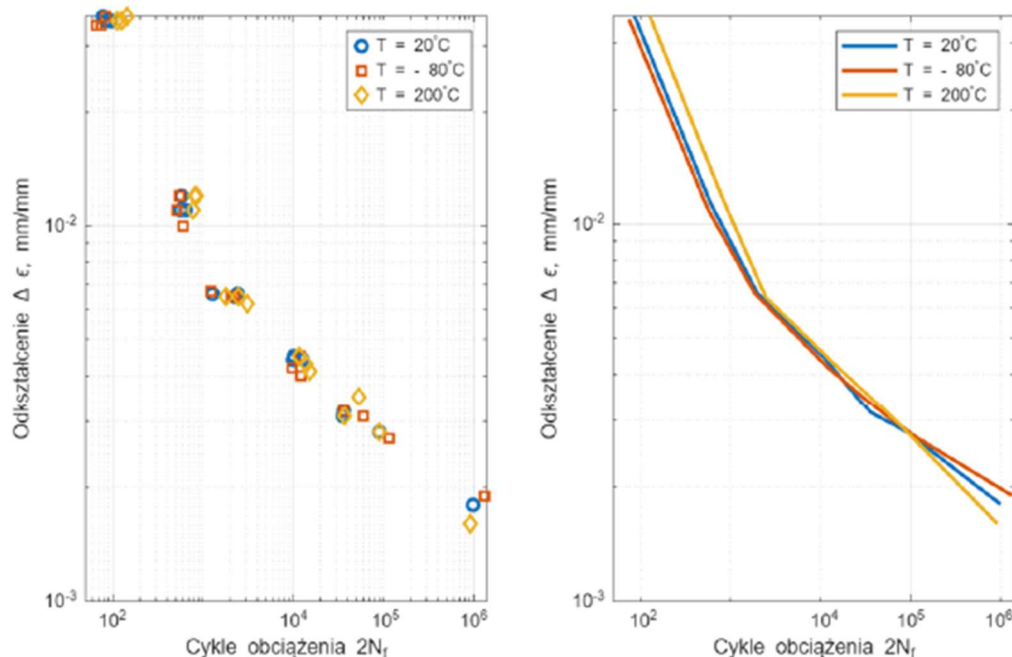
Tab 1. Dane wytrzymałościowe stopu AISI420.

Temp. °C	E , GPa	R_m , MPa	$R_{e0.2}$, MPa	RA , %	Twardość HB
-80	208	1140	917	20	274
0	205	1096	885	23	261
20	200	1052	853	25	250
100	191	977	784	28	229
200	182	911	694	32	210
300	166	826	627	38	182
360	157	738	533	44	157

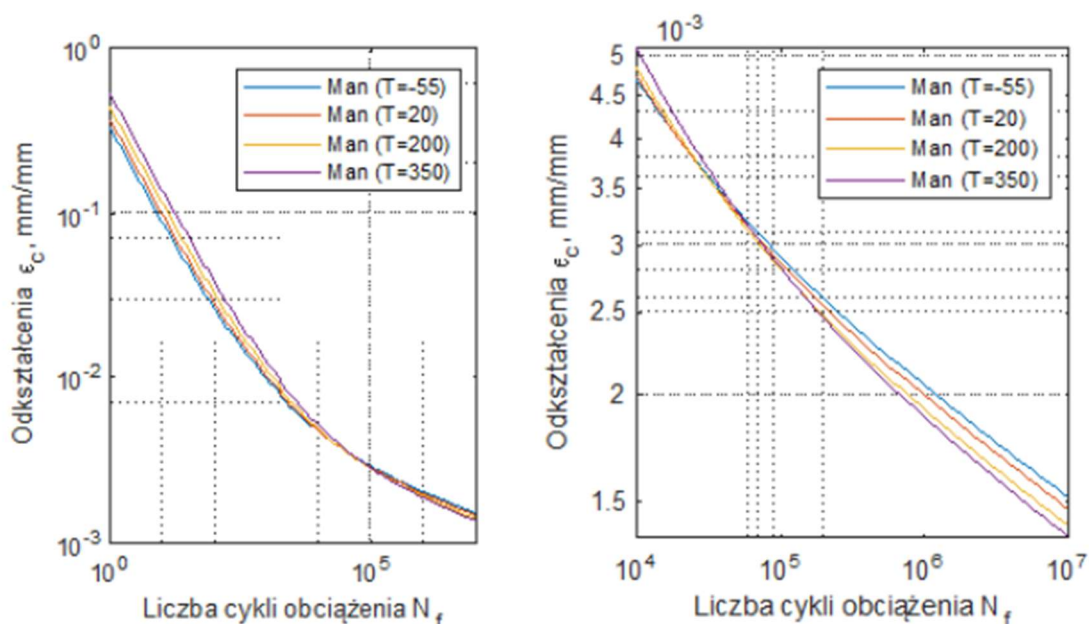
Zweryfikowano, że w niskich temperaturach stal martenzytyczna AISI420 (przyjęta jako zbieżna z EI961) oraz stopy o wysokiej zawartości chromu wykazują jednoczesny wzrost modułu Younga, granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie i twardości, co wynika z ograniczonej ruchliwości dyslokacji i zwiększonej kruchości struktury. W miarę podnoszenia się temperatury wszelkie parametry wytrzymałościowe stopniowo maleją za sprawą relaksacji naprężeń i osłabienia układu krystalicznego, przy jednoczesnym wzroście plastyczności – przejawiającym się w większym względnym przewężeniu próbki przed zerwaniem. Po przekroczeniu 300 °C destabilizacja martenzytu i przemiany mikrostrukturalne prowadzą do gwałtownego spadku sztywności, wytrzymałości, granicy plastyczności, twardości oraz odporności na ścieranie, co oznacza istotną degradację właściwości mechanicznych. Otrzymane (i zaprezentowane w tabelach) wartości potwierdzają obserwowane w dokumentacji MMPDS i literaturze tendencje, a zgromadzone dane posłużyły do budowy eksperymentalnych i numerycznych modeli zmęczeniowych przy założeniu, że stop EI961 reaguje na temperaturę identycznie jak AISI420.

Omówione powyżej bazowe badania materiałowe były wstępem do materiałowych badań zmęczeniowych i określenia wielkości opisujących zmęczenie niskocyklowe związane z lokalnym odkształceniem ($\epsilon-N$), przy różnych wartościach temperatury otoczenia. W badaniach stopu AISI420 uwzględniono trzy stany termiczne $T = 20$ °C, $T = -80$ °C i $T = 200$ °C. Dla założonych warunków temperatury przeprowadzono serię badań zmęczeniowych i wyznaczono ilość cykli obciążenia do zainicjowania pęknięcia zmęczeniowego. Na podstawie przeprowadzonych testów, wyznaczono wartości średnie i dokonano wyznaczenia krzywych prezentujących zależność pomiędzy odkształceniami i a liczbą cykli do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego (rys. 1).

Równolegle prowadzone były badania literaturowe dążące do oszacowania i wykreślenia krzywych Mansona-Coffina-Basquina w zależności od temperatury (która wpływa na właściwości mechaniczne). Opierając się na przeprowadzonych badaniach literaturowych wytypowano kilka modeli zmęczeniowych do uwzględnienia i weryfikacji w ramach prowadzonych badań. Na potrzeby dalszych obliczeń wytypowano 8 różnych modeli zmęczenia materiału: Manson, 4-punktowy Manson, Mitchell, Muralidharan-Manson, Baumel-Seeger, Ong, Roessle-Fatemi i Mediana. Uwzględniając dane z tabeli 1, wyznaczono modele zmęczeniowe (dla równania Mansona-Coffina-Basquina, które opisuje zmęczenie $\epsilon-N$). Otrzymane krzywe zmęczeniowe przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Wyniki eksperymentalnych badań zmęczeniowych stopu AISI420, metodą odkształcenia lokalnego (ϵ - N) dla różnych warunków temperaturowych.



Rys. 2. Krzywe zmęczeniowe Mansona-Coffina-Basquina opisujące zmęczenie ϵ - N .

Dla trzech analizowanych stanów termicznych skonstruowano osiem analitycznych krzywych $\epsilon - N$ i zestawiono je z wynikami badań doświadczalnych (rys. 1). Modele Onga i Mitchella wykazały najłabsze dopasowanie, a Muralidharan-Manson i Roessle-Fatemi rozbieżności przy liczbie cykli poniżej 10^4 . Model Mitchell pokazał umiarkowaną korelację, lecz z przesunięciem w kierunku niższych odkształceń. Najbardziej zadowalające odwzorowanie uzyskały modele Mansona, czteropunktowy Manson, Baumel-Seeger oraz Median. Przy -80°C najwierniej przebieg badań od 10^3 cykli do końca

(odkształcenia 0–0,008) oddawał Manson 4-punktowy, przy czym przy amplitudach powyżej 0,008 należy stosować podejście konserwatywne (Man lub Man4). Na 20 °C model Mansona sprawdza się przy dużych amplitudach, a Man4 przy mniejszych. Podobnie w przypadku 200 °C, najlepszy jest model Median dla wysokich amplitud odkształceń, potem Man4, choć w obszarze $2 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$ cykli wszystkie te modele przeceniają odporność materiału. Wyniki wskazują na konieczność dalszych badań niskocyklowych oraz ich modyfikacji albo opracowania nowych modeli, lepiej uwzględniających wpływ temperatury na zmęczeniowe właściwości stopu.

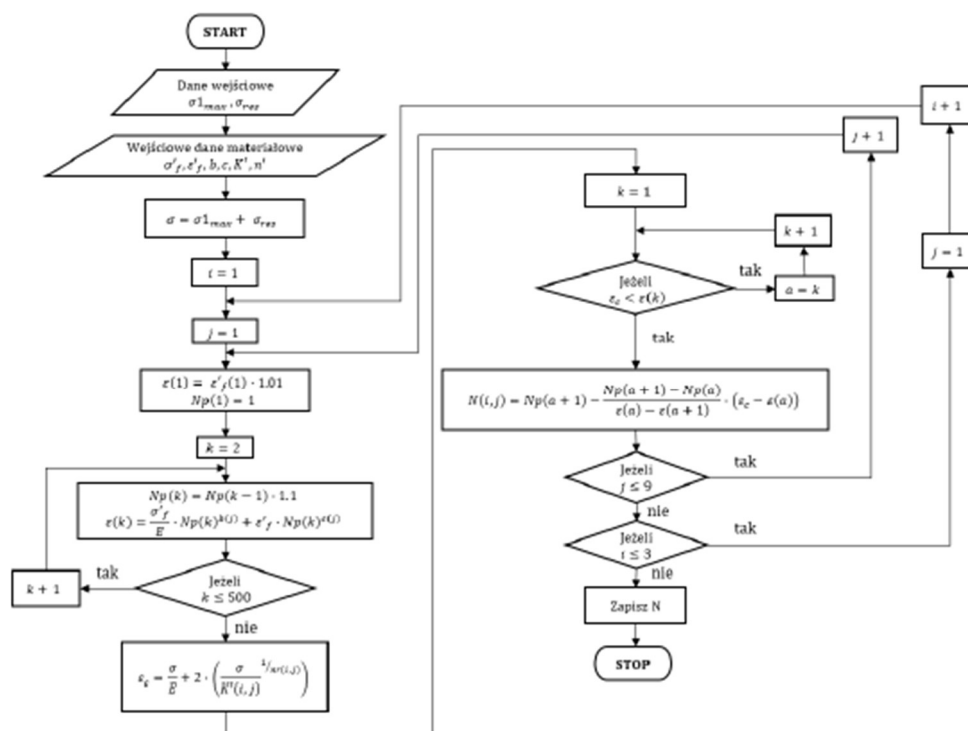
Sama analiza zmęczeniowa wymaga również uwzględnienia umocnienia cyklicznego. Do analiz wytypowano równanie Ramberga-Osgooda. Przeprowadzone badania literaturowe doprowadziły do wytypowania trzech modeli umocnienia: Mansona, Fatemiego oraz Xianxina. Uwzględnienie tych modeli, w połączeniu z konfiguracjami modeli zmęczeniowych i temperatur pracy, pozwoliły na przygotowanie tabeli 2 z wartościami K' i n' w różnych konfiguracjach.

Tab. 2. Modele cyklicznego umocnienia RO dla kilku modeli MCB i warunków temperaturowych.

Temp	RO	Modele MCB ($\varepsilon - N$)							
		Man	Mit	MM	BS	Ong	RF	Med	
-55	K'	Man	2685,6	2303,5	4632,5	2021,0	1952,1	2140,6	1984,1
		Fat	2685,6	2674,2	3798,9	1933,0	3657,9	1959,5	1910,3
		Xian	3949,3	3949,3	3949,3	3949,3	3949,3	3949,3	3949,3
	n'	Man	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
		Fat	0,20	0,27	0,16	0,15	0,48	0,16	0,15
		Xian	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
200	K'	Man	2025,3	1796,2	3662,4	1589,5	1506,2	1882,2	1583,8
		Fat	2025,3	2090,0	3017,2	1525,9	2285,5	1699,0	1524,9
		Xian	2658,8	2658,8	2658,8	2658,8	2658,8	2658,8	2658,8
	n'	Man	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
		Fat	0,20	0,28	0,16	0,15	0,43	0,16	0,15
		Xian	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
350	K'	Man	1644,0	1513,4	3068,1	1334,5	1256,9	1676,8	1337,4
		Fat	1644,0	1761,5	2534,5	1283,0	1719,6	1492,3	1287,7
		Xian	2032,3	2032,3	2032,3	2032,3	2032,3	2032,3	2032,3
	n'	Man	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
		Fat	0,20	0,30	0,16	0,15	0,40	0,16	0,15
		Xian	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Efektom przeprowadzonych badań i prac przygotowawczych był algorytm obliczeń zmęczeniowych uwzględniający temperaturę odniesienia/pracy, wartość naprężenia (główne σ_1 lub zredukowane σ_{eqv} oraz szczytkowe po kulowaniu σ_{res}), krzywą Mansona-Coffina-Basquina ($\varepsilon-N$), umocnienie cykliczne wg równania Ramberga-Osgooda oraz korekcję naprężeń średnich Goodmana. Schemat blokowy tego kodu/algorytmu zaprezentowano na rysunku 3. Takie zestawienie konfiguracji materiałowych i opisujących zachowanie materiału w złożonym stanie obciążenia zostało przyjęte jako wystarczająco zweryfikowane i słuszne, bowiem obliczenia były realizowane równocześnie dla kilku modeli $\varepsilon-N$ i Ramberga-Osgooda. Z kolei wybór korekcji naprężeń

średnich Goodmana wynika z typu materiału i faktu, że stan obciążenia w badanym obiekcie może różnić się od wahadłowego (zaś literatura sugeruje konieczność korekcji naprężeń w przypadku cykli innych niż wahadłowe, czyli dwustronne ze średnią wartością naprężenia równą zero).

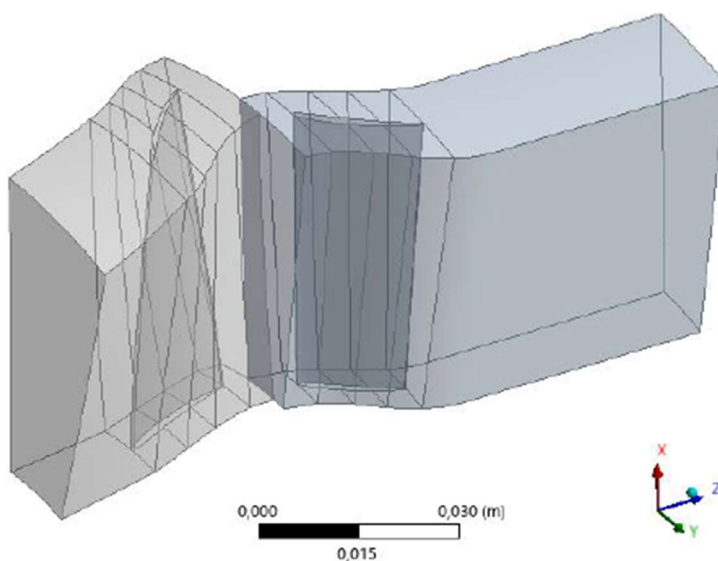


Rys. 3. Schemat blokowy kodu do obliczeń zmęczeniowych uwzględniający model MCB, model RO, naprężenia szczytowe oraz naprężenia główne.

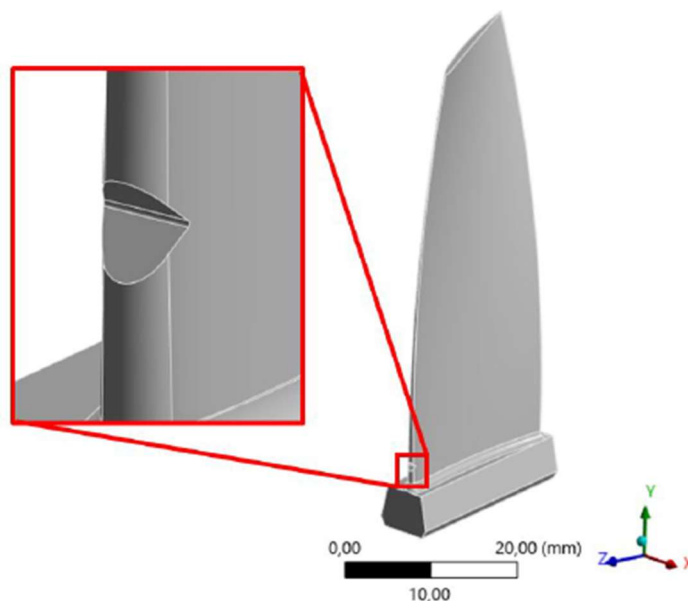
Po przygotowaniu danych materiałowych, skupiono się na opracowaniu modelu łopatki oraz analizach wytrzymałościowych uwzględniających różne warunki pracy (wynikające z wirowania, obciążeń aerodynamicznych i termicznych). Model geometryczny do późniejszych obliczeń wykonano z użyciem trzech różnych narzędzi inżynierii odwrotnej, ukazując ich użyteczność i ograniczenia.

Każde z trzech stosowanych narzędzi inżynierii odwrotnej – analiza Vista AFD (moduł w oprogramowaniu ANSYS), skan 3D i destrukcyjne cięcia z mikroskopią – oferuje unikalne korzyści, ale i wiąże się z określonymi ograniczeniami. Vista AFD pozwala w krótkim czasie uzyskać przybliżoną geometrię stopnia oraz podstawowe parametry pracy, wymagając jednak uprzednich danych przepływowych i geometrycznych oraz weryfikacji na modelu rzeczywistym. Dodatkowo, korzyścią płynącą z wykorzystania Vista AFD jest wygenerowanie geometrii łopatki a także przygotowanie domeny przepływowej na potrzeby analizy przepływowej – rysunek 4. Skanowanie 3D, choć nieinwazyjne, pociąga za sobą koszty sprzętu, a precyzja odwzorowania profilu, zaokrągleń i zamka (w opisywanym przypadku 0,02 mm) zależy od wybranej aparatury. Cięcia i zdjęcia mikroskopowe dostarczają najbardziej dokładnego kształtu przekroju pióra, lecz są metodą niszczącą, co może być problematyczne przy większych elementach. Zestawienie oraz iteracyjne wykorzystanie wszystkich trzech technik pozwala wzajemnie weryfikować otrzymywane profile i zapewnia najlepszą dokładność modelu – właśnie

taką metodykę zastosowano w omawianej monografii habilitacyjnej, by odtworzyć geometrię łopatki sprężarki osiowej silnika lotniczego. Obliczona masa modelu przy gęstości $\rho = 7790 \text{ kg/m}^3$ wyniosła 16,11 g, co dobrze pokrywa się z rzeczywistą masą $15,85 \pm 0,75 \text{ g}$ i potwierdza trafność przygotowanego modelu a przez to symulacji naprężeń. Dla zbadania wpływu uszkodzeń typu FOD przygotowano dodatkowy wariant z V-kształtnym karbem umiejscowionym 3 mm od stopki na krawędzi natarcia, o głębokości 0,5 mm i promieniu zaokrąglenia 0,05 mm. Pełna weryfikacja modelu, m.in. poprzez analizę częstotliwości rezonansowych, została omówiona w kolejnych rozdziałach omawianej habilitacji. Model łopatki wraz z karbem zaprezentowano na rysunku 5.



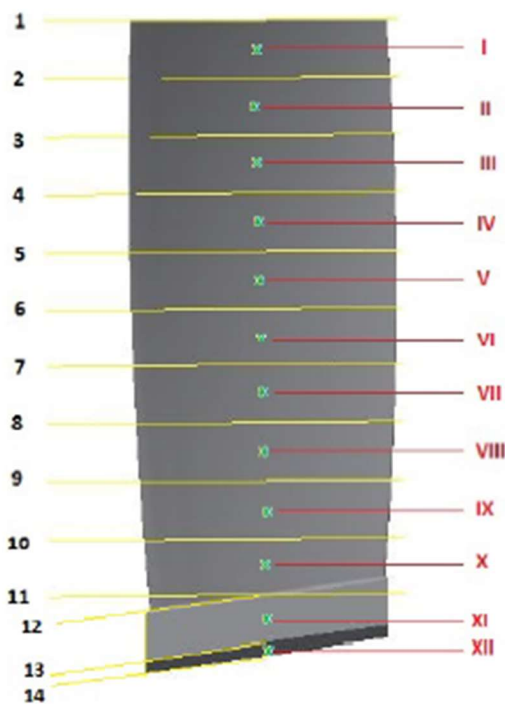
Rys. 4. Geometria łopatki wirnika i statora, wraz z wygenerowaną domeną płynu na potrzeby analizy przepływowej z VISTA AFD.



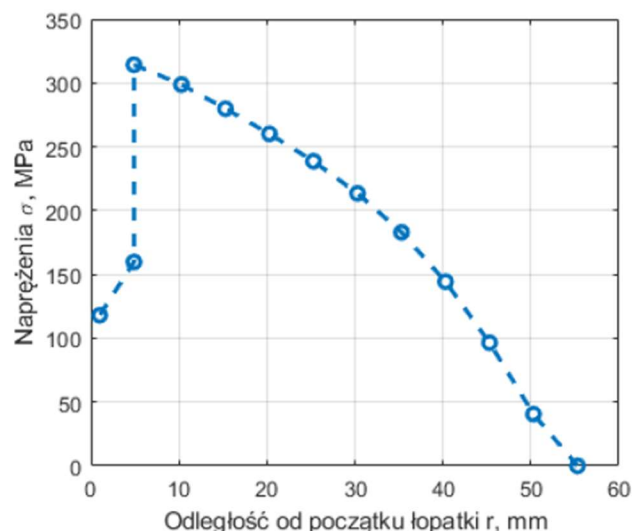
Rys. 5. Geometria łopatki sprężarki osiowej wraz z zamodelowanym karbem V-kształtnym.

Przed przeprowadzeniem analiz wytrzymałościowych z wykorzystaniem zaawansowanego oprogramowania inżynierskiego Ansys, w oparciu o metodę elementów skończonych (MES), przeprowadzono klasyczne obliczenia analityczne.

W ramach obliczeń analitycznych należało dokonać dyskretyzacji łopatki, poprzez podzielenie jej na elementy proste o znanej długości. Szczegółowy algorytm został zawarty w monografii. Podział łopatki na elementy i przekroje charakterystyczne zaprezentowano na rysunku 6. Otrzymane w ten sposób wyniki posłużyły później do weryfikacji analiz numerycznych, przy czym kluczowymi parametrami są maksymalne naprężenie rozciągające σ_1 oraz przemieszczenie promieniowe U_{rad} . Obliczone $U_{rad} = 0,056$ mm mieści się w typowym dla maszyn obrotowych zakresie do 0,5 mm, choć zależy od wysokości łopatki. Ze względu na uproszczenia modelu – pominięcie skrzywienia pióra, przejścia w stopkę oraz działania sił aerodynamicznych – wyniki traktować należy jako przybliżone. Ujęcie zaokrąglenia w przejściu pióra w stopkę przy współczynniku koncentracji naprężeń $K_t = 3$ prowadziłoby do $\sigma = 942$ MPa. Prezentowane obliczenia stanowią jedynie wstępne, zgrubne oszacowanie możliwego stanu obciążeń. Rozkład naprężeń wzdłuż wysokości łopatki przedstawiony został na rysunku 7.



Rys. 6. Łopatka z definicją dyskretyzacji – z podziałem na przekroje (liczby arabskie) i elementy (liczby rzymskie).

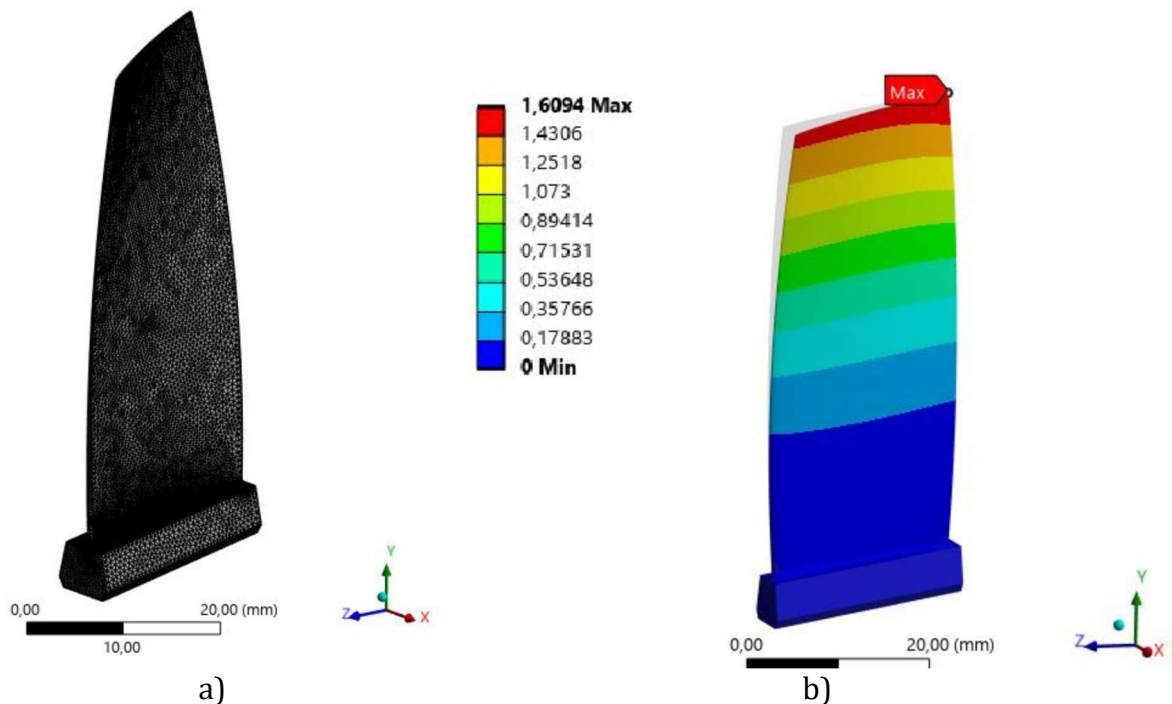


Rys. 7. Rozkład naprężeń rozciągających wzdłuż wysokości łopatki.

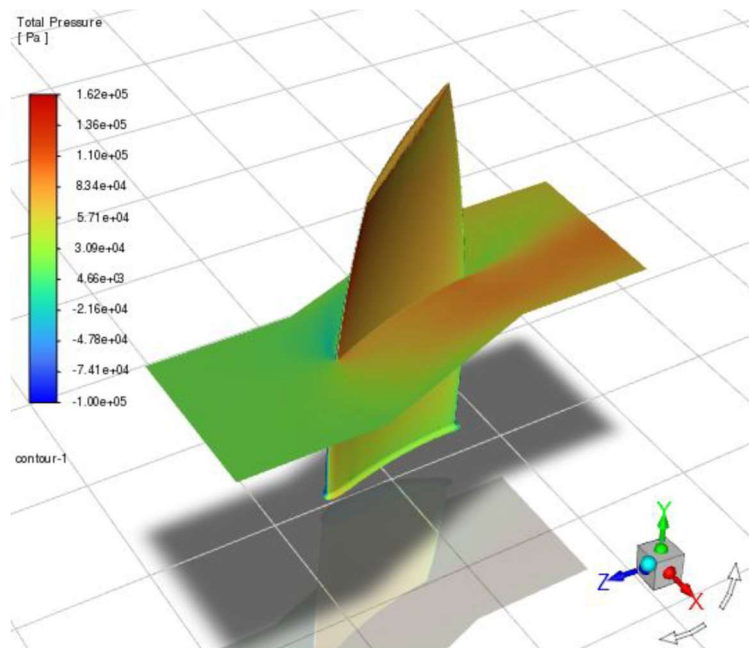
Wspomniany wcześniej model został wykorzystany w obliczeniach wytrzymałościowych metodą MES. W rzeczywistych warunkach pracy łopatki, najistotniejszy wpływ na poziom naprężeń i trwałość wywiera siła odśrodkowa związana z wirowaniem, podczas gdy obciążenia aerodynamiczne obniżają wyężenie i wydłużają żywotność, a podwyższona temperatura osłabia strukturę materiału, negatywnie wpływając na zmęczenie. Wspomniane warunki brzegowe oparły się o ten sam model zdyskretyzowanej łopatki, zaprezentowany na rysunku 8a. Same obciążenia od wirowania, aerodynamiczne i termiczne, zostały przeanalizowane niezależnie w celu określenia wpływu poszczególnych obciążeń na poziom wyężenia w analizowanej konstrukcji. We wszystkich przypadkach wyznaczano przemieszczenia całkowite U_{sum} , przemieszczenia promieniowe U_{rad} i przemieszczenia obwodowe U_{tan} . W wyniku przeprowadzanych analiz wytrzymałościowych wyznaczano również naprężenia zredukowane (według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego) i naprężenia główne σ_1 . Przykład przemieszczeń całkowitych dla łopatki obciążonej siłami bezwładności (prędkość obrotowa) jest zaprezentowany na rysunku 8b.

W ramach analizy przepływowej w programie Fluent określono wartości ciśnień statycznych oddziałujących na ścianki łopatki. Określono również globalną dystrybucję ciśnienia całkowitego na płaszczyźnie połowiącej kanał przepływowy (rys. 9).

Weryfikacja złożonego stanu obciążeń metodą elementów skończonych objęła zamocowanie stopki, prędkość obrotową 30000 RPM, warunki aerodynamiczne przelotu oraz temperatury od -55°C do 200°C , ujawniając wzrost naprężenia zredukowanego od 829,12 MPa przy -55°C , przez 866,95 MPa przy 20°C , do 966,49 MPa przy 200°C , oraz naprężenia głównego od 932,95 MPa do 1019,7 MPa, co odpowiada przyrostowi rzędu 17% i 9% względem warunków referencyjnych.



Rys. 8. Zdyskretyzowany model łopatki sprężarki osiowej (a) oraz przemieszczenia całkowite w trakcie obciążenia siłami bezwładności (b).



Rys. 9. Rozkład ciśnienia całkowitego w kanale przepływowym oraz na powierzchni łopatki, z analizy przepływowej stopnia sprężarki osiowej.

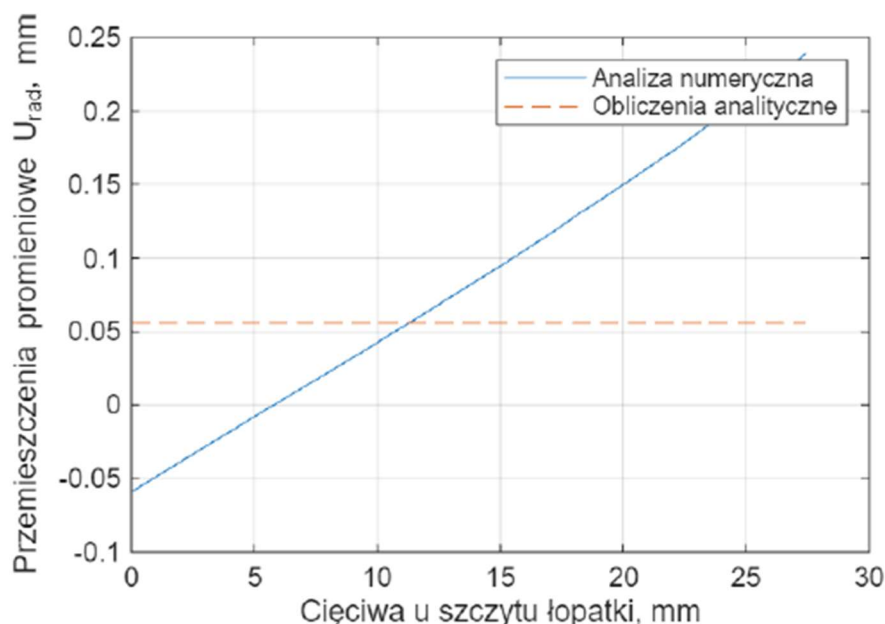
Jednym z kroków badawczych podejmowanych w ramach omawianej monografii habilitacyjnej było określenie częstotliwości rezonansowych łopatki w zależności od rodzaju obciążenia. Dodatkowo określono potencjalny wpływ wprowadzonego uszkodzenia V-kształtnego na częstotliwości rezonansowe. W analizach uwzględniono różne konfiguracje, składające się z: różnych modeli (cała łopatka lub uszkodzona) oraz różnych stanów obciążenia mechanicznego (łopatka wirująca lub bez wirowania) oraz

przepływowego (obciążenia napływem powietrza lub brak uwzględniania). Wyniki przeprowadzonych analiz zestawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Częstotliwości rezonansowe badanej łopatki sprężarki, w zależności od modelu i stanu obciążenia wstępnego.

	Częstotliwość rezonansowa f_{rez} , Hz					
	Cała		Uszkodzona		Cała	
	Brak przepływu	Wirująca	Brak przepływu	Wirująca	Przepływ	Wirująca
	Brak wirowania	Wirująca	Brak wirowania	Wirująca	Brak wirowania	Wirująca
1	829,5	1119,8	829,09	1119,3	829,97	1120,1
2	2566,9	2775,4	2565,4	2774,3	2570,1	2779,2
3	3526,1	3754,6	3525,2	3753,3	3528,8	3756,6
4	6442,4	6631,4	6435,9	6625	6444,7	6633,5
5	7564,5	7754,7	7562	7752,6	7567,1	7758
6	8515,3	8618,5	8514	8617,3	8518,6	8621,3
7	9677,4	9754,2	9675,8	9752,5	9678,5	9755,7
8	11706	11875	11703	11873	11716	11886
9	14021	14334	14017	14330	14029	14343
10	15933	16011	15930	16007	15935	16012

Dzięki tak szeroko przeprowadzonym badaniom rezonansowym, określono wpływ poszczególnych składowych obciążenia całkowitego, na odpowiedź mechaniczną konstrukcji. Znajomość częstotliwości rezonansowych zawsze korelowana jest z prędkościami obrotowymi i warunkami pracy wirnika silnika lotniczego.



Rys. 10. Porównanie przemieszczeń promieniowych szczytu pióra łopatki, oszacowanych analitycznie i w ramach obliczeń MES.

Obliczona na podstawie analizy MES dotyczącej sił bezwładności, wartość przemieszczenia promieniowego w obszarze środka aerodynamicznego wyniosła

0,062 mm, podczas gdy w uproszczonych obliczeniach analitycznych uzyskano 0,056 mm, co wskazuje na niedoszacowanie odkształceń z powodu pominięcia skrzywienia pióra oraz deformacji obwodowych (błąd ok. 10%). Numeryczne określone naprężenie główne przekroczyło granicę plastyczności stopu ($\sigma_1 = 951$ MPa przy $R_e = 850$ MPa), co sygnalizuje obszary krytyczne, zwłaszcza przy przejściu pióra w stopkę; w modelu analitycznym bez karbu wartość ta wynosiła jedynie 314 MPa, lecz po uwzględnieniu współczynnika koncentracji naprężeń skorygowano ją do $\sigma = 942$ MPa, uzyskując zgodność z wynikami obliczeń o metodę elementów skończonych. Pomimo uproszczeń, prezentowane obliczenia stanowią solidną bazę do dalszych, bardziej zaawansowanych analiz, obejmujących dynamikę lotu, obciążenia manewrowe, turbulencje oraz ryzyko rezonansu, które mają kluczowy wpływ na trwałość elementów silników lotniczych.

Przygotowane wyniki analizy modalnej (rezonansowej) posłużyły do weryfikacji modelu. Po przeprowadzeniu weryfikacji z badaniami eksperymentalnymi (literaturowymi), przeprowadzono analizę zmęczeniową ϵ -N dla badanej łopatki, przy założeniu różnych naprężeń i różnych amplitud drgań (przy temperaturze $T = 20^\circ\text{C}$). Wyniki analizy zmęczeniowej zestawiono w tabeli 4.

Tab. 4. Wyniki analiz zmęczeniowej ϵ -N łopatki sprężarki pracującej w stanie rezonansu o założonych amplitudach.

MCB/RO	$A = 1,5$ mm		$A = 1,8$ mm	
	$\sigma_{eqv} =$ 822 MPa	$\sigma_1 =$ 976 MPa	$\sigma_{eqv} =$ 987 MPa	$\sigma_1 =$ 1171 MPa
Man/Man	3703	262	219	11
Man4/Man	1034	71	59	3
BS/Man	604	40	33	2
Med/Man	531	37	31	2
Man/Fat	3703	262	219	11
Man4/Fat	2938	147	120	4
BS/Fat	6994	193	150	3
Med/Fat	5053	159	125	2
Man/Xian	1542	209	182	21
Man4/Xian	1092	147	129	15
BS/Xian	2449	313	271	29
Med/Xian	2340	313	272	30
Maksymalna	6994	313	272	30
Minimalna	531	37	31	2

Uzyskane wyniki analizy zmęczeniowej, otrzymane w sposób analityczny, porównano z danymi eksperymentalnymi, zestawionymi w tabeli 5. Oszacowane trwałości były dużo większe od danych eksperymentalnych. Obserwowana różnica może wynikać z występowania naprężeń wstępnych/szczałkowych w rzeczywistym elemencie, stąd też dalszy kierunek badań oparty o weryfikację tych wartości w badanej łopatce.

Tab. 5. Literaturowe dane o liczbie cykli do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego dla badanej łopatki sprężarki.

No.	Amplituda drgań A, mm	$N_{in} \cdot 10^3$
1.	1,5	190,3
2.	1,8	12,9

Ostatni etap badań wytrzymałościowych, opierających się o wspomniane powyżej wyniki, polegał na wyznaczeniu liczby cykli do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego łopatki sprężarki osiowej pracującej w zmiennym polu temperatury od -55°C do 200°C przy prędkości obrotowej 30000 RPM i jednoczesnym uwzględnieniu obciążeń aerodynamicznych, przedstawiono w tabeli 6 i 7.

Tab. 6. Trwałość zmęczeniowa łopatki wyznaczona metodą $\epsilon-N$, dla temperatury $T = -55^{\circ}\text{C}$, dla łopatki wirującej lub wirowanie z uwzględnieniem obciążeń aerodynamicznych.

MCB/RO	Wirowanie		Wirowanie+Aero	
	$\sigma_{eqv} =$ 914,01 MPa	$\sigma_1 =$ 1039,33 MPa	$\sigma_{eqv} =$ 829,12 MPa	$\sigma_1 =$ 932,95 MPa
Man/Man	2148	289	9240	1574
Man4/Man	602	78	2815	434
BS/Man	338	43	1568	244
Med/Man	300	40	1333	220
Man/Fat	2148	289	9240	1574
Man4/Fat	1593	164	8408	1113
BS/Fat	3249	217	23 943	2136
Med/Fat	2403	178	16 235	1604
Man/Xian	916	213	2793	728
Man4/Xian	618	143	1917	486
BS/Xian	1631	363	5205	1289
Med/Xian	1643	384	5060	1308
Maksymalna	3249	384	23 943	2136
Minimalna	300	40	1333	220

Wyniki analizy MES dostarczyły wartości naprężeń głównych i zredukowanych, które posłużyły do obliczeń z wykorzystaniem modeli zmęczeniowych (Manson-Coffin-Basquin, Ramberg-Osgood i wariantów współczynników umocnienia cyklicznego).

Dla najniższej temperatury (-55°C , odpowiadającej warunkom na pułapie około 11 km) zastosowanie siły odśrodkowej razem z aerodynamiką wydłużyło życie zmęczeniowe nawet do około 24 000 cykli (model BS/Fat), podczas gdy najkrótsza żywotność wyniosła zaledwie 1333 cykle (model Med/Man). Gdy pominięto obciążenia aerodynamiczne, maksymalna liczba cykli spadła ponad siedmiokrotnie, a minimalna około czterokrotnie, co podkreśla korzystny wpływ aerodynamicznego rozproszenia naprężeń. Obniżenie temperatury zwiększyło moduł Younga, zmniejszając w ten sposób poziom naprężeń i poprawiając trwałość zmęczeniową, w porównaniu z warunkami referencyjnymi przy 20°C .

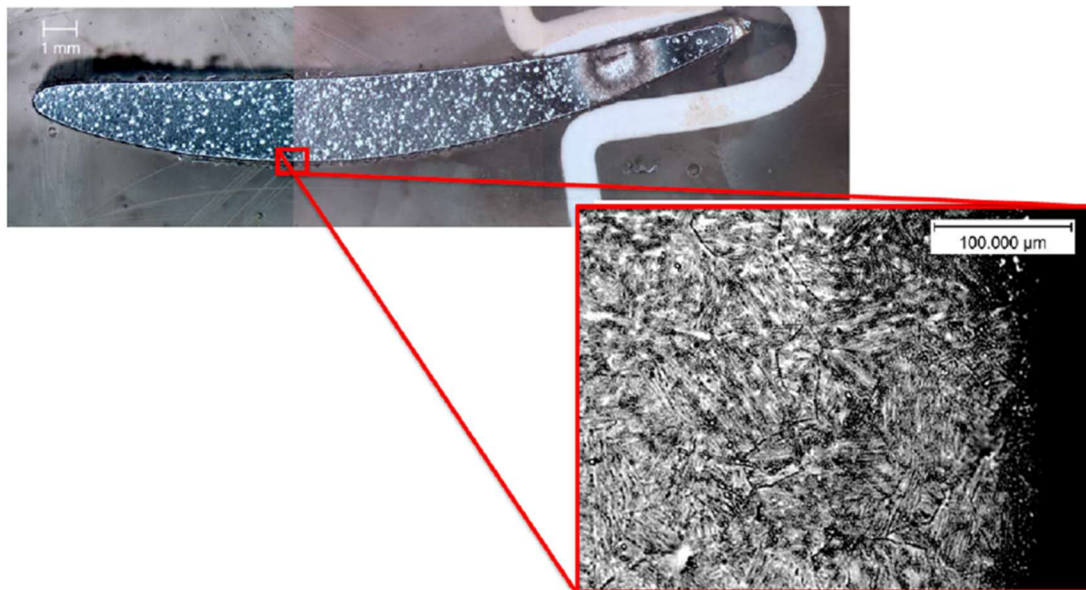
Tab. 7. Trwałość zmęczeniowa łopatkki wyznaczona metodą ϵ -N, dla temperatury $T = 20^{\circ}\text{C}$, dla łopatkki wirującej lub wirowanie z uwzględnieniem obciążeń aerodynamiczny.

$T = 20^{\circ}\text{C}$	Wirowanie		Wirowanie+Aero	
	$\sigma_{eqv} =$ 952 MPa	$\sigma_1 =$ 1064,9 MPa	$\sigma_{eqv} =$ 866,95 MPa	$\sigma_1 =$ 963,92 MPa
Man/Man	389	62	1654	320
Man4/Man	105	17	457	86
BS/Man	59	9	263	49
Med/Man	56	9	237	46
Man/Fat	389	62	1654	320
Man4/Fat	231	29	1189	184
BS/Fat	329	27	2359	253
Med/Fat	266	24	1771	205
Man/Xian	281	71	831	242
Man4/Xian	198	51	585	170
BS/Xian	423	104	1300	362
Med/Xian	421	108	1250	361
Maksymalna	423	108	2359	362
Minimalna	56	9	237	46

W skrajnym przypadku wysokiej temperatury (200°C) nastąpiło drastyczne ograniczenie liczby dopuszczalnych obciążeń zmęczeniowych. Po uwzględnieniu wirowania i aerodynamiki maksymalna żywotność wyniosła jedynie 46 cykli (model BS/Xian), a minimalna 4 cykle (Med/Man). Niektóre modele, operujące liniową aproksymacją poza zakresem ważności danych materiałowych, zwróciły wartości ujemne, co oznacza przekroczenie granic ich stosowalności. Wysoka temperatura podnosi poziom naprężeń i jednocześnie pogarsza właściwości materiału, co z punktu widzenia trwałości zmęczeniowej jest krytyczne.

Uzyskane wyniki stanowią teoretyczną granicę żywotności, pomijając wzmocnienie powierzchniowe, które w praktyce znacznie wydłużyłoby trwałość. Mimo tego badania uwydatniają, jak silnie zmiana temperatury wpływa ilościowo i jakościowo na trwałość zmęczeniową łopatkki, oraz że tylko pełna analiza MES, skorelowana z odpowiednimi modelami materiałowymi, pozwala rzetelnie ocenić rzeczywiste zagrożenia trwałościowe.

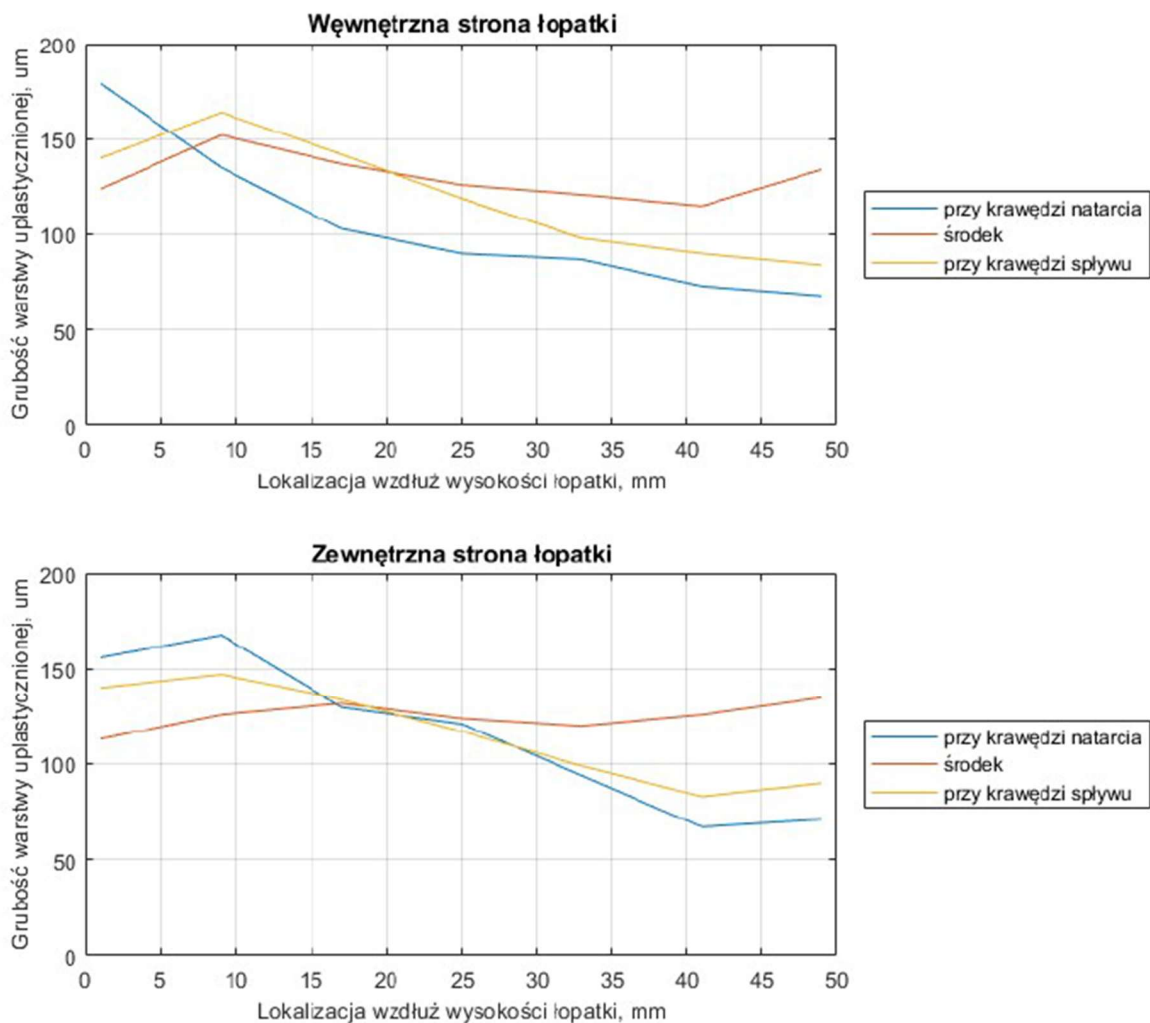
Wspomniane powyżej wyniki nie uwzględniają naprężenia szczątkowego, którego oszacowanie i wprowadzenie do analizy wpłynie pozytywnie na szacowaną trwałość zmęczeniową. Aby móc dokładniej ocenić wspomniany efekt należało ocenić poziom uplastycznienia materiału wskutek obróbki powierzchniowej oraz zmierzyć wartość naprężenia szczątkowego, jakie obserwowane jest w łopatkce (na przykładzie rysunku 11). Dodatkowo, w celu weryfikacji modeli numerycznych, wykorzystano literaturowe dane dotyczące trwałości zmęczeniowej podobnej łopatkki sprężarki.



Rys. 11. Przekrój łopatki raz z powiększeniem ukazującym granice ziaren.

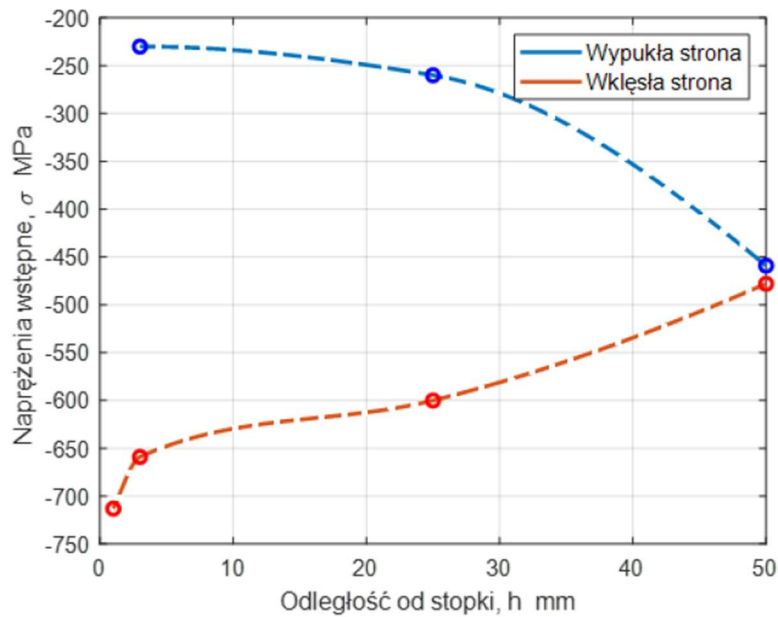
Aby ocenić wpływ obróbki kulowaniem na strukturę ziaren łopatki sprężarki, wycięto piłą diamentową próbki o grubości 8 mm, zablokowano je w żywicy, wypolerowano, a następnie trawiono chemicznie i elektrolitycznie. Mikroskop optyczny wraz z oprogramowaniem do analizy obrazu pozwolił zmierzyć średnicę ziarna oraz głębokość strefy uplastycznionej w sześciu punktach: na krawędzi natarcia, w części środkowej i na krawędzi spływu – po stronach wewnętrznej i zewnętrznej profilu – oraz w dwóch punktach wewnątrz przekroju. Średnia wielkość ziarna w materiale wyjściowym wyniosła 72 μm , podczas gdy w warstwie najbardziej narażonej na zmęczenie – przy krawędzi natarcia – zmierzono ok. 27 μm , ze strefą uplastycznioną grubości 68 μm . Wewnętrzna strona łopatki wykazała najmniejsze ziarna (26 μm przy krawędzi natarcia), a największe (47 μm) przy krawędzi spływu; na czubku największe ziarno miało 48 μm . Po stronie zewnętrznej ziarna wahały się od 27 μm przy natarciu do 46 μm w środkowej części, a grubość uplastycznionej warstwy przekraczała 150 μm przy natarciu, malejąc w kierunku czubka. Rozkład zmiany rozmiaru ziarna wzdłuż wysokości łopatki został zaprezentowany na rysunku 12.

Rozkład grubości ziaren na całej powierzchni łopatki wykazał największą deformację (najdrobniejsze ziarno) przy punkcie z cięciwy równym 0 mm, co sprzyja powstawaniu korzystnych naprężeń szczątkowych ściskających i zwiększa odporność na inicjację pęknięć zmęczeniowych. W analizie modalnej drgań rezonansowych o amplitudzie $A = 1,8$ mm zaobserwowano koncentrację naprężeń głównych σ_1 w dnie karbu, sięgających około 987 MPa – przekraczających granicę plastyczności $R_e = 853$ MPa – z maksimum w odległości 70 μm od wewnętrznej powierzchni. Dominująca składowa naprężeń Z wskazuje na stan rozciągania w tej strefie. Wyniki potwierdzają, że kulowanie generuje istotne naprężenia szczątkowe, które dzięki zmniejszeniu ziarna i pogłębieniu warstwy uplastycznionej znacząco wydłużają trwałość zmęczeniową łopatki.



Rys. 12. Zmiana grubości warstwy uplastycznionej wzdłuż wysokości łopatki, po wewnętrznej i zewnętrznej stronie pióra.

Do dokładnego określenia naprężeń szczątkowych powstałych w wyniku kulowania wykorzystano dyfraktometr rentgenowski Micro μ -X360s, mierząc σ_{res} po obu stronach dwóch łopatek. Na stronie wklęsłej przy podstawie odnotowano największe ściskające naprężenie rzędu -713 MPa, które na wysokości $h = 3$ mm zmniejszyło się do -659 MPa; po stronie wypukłej w tym samym punkcie zmierzono -230 MPa, a przy czubku ok. -470 MPa. Różnica między strefami wklęsłą i wypukłą wyniosła około 430 MPa, co wskazuje na zróżnicowaną intensywność kulowania (zmiana wartości zaprezentowana na rysunku 13). Średnie wartości, dla późniejszych obliczeń, przyjęto jako $\sigma_{res} = -463$ MPa (strona wewnętrzna) i -213 MPa (zewnętrzna), z uwzględnieniem, że pęknięcie zmęczeniowe rozprzestrzenia się szybciej po wewnętrznej stronie łopatki. Po przecięciu próbki na plastry naprężenie w punkcie wewnętrznym spadło z -659 MPa do -386 MPa (o ponad 41%). Sam pomiar został zaprezentowany na rysunku 14.



Rys. 13. Rozkład naprężeń szczątkowych wzdłuż wysokości łopatki sprężarki.



Rys. 14. Pomiar naprężeń szczątkowych z wykorzystaniem systemu Pulstec.

Uzyskane σ_{res} wykorzystano w analizie zmęczeniowej metodą superpozycji, łącząc je z wartościami naprężeń zredukowanych $\sigma_{eqv} = 822$ MPa dla amplitudy drgań $A = 1,5$ mm oraz $\sigma_{eqv} = 987$ MPa dla $A = 1,8$ mm. Dla dwunastu kombinacji modeli zmęczeniowych (Manson–Coffin–Basquin) i umocnienia cyklicznego (Ramberga–Osgooda) największą liczbę cykli do inicjacji pęknięcia przy $A = 1,5$ mm uzyskała konfiguracja BS/Fat – $0,8 \cdot 10^6$ cykli, co stanowi około 42, 5% wyniku eksperymentalnego. Taka rozbieżność wynika z faktu, że eksperyment obejmuje także rozwój pęknięcia do wykrywalnej wielkości, podczas gdy obliczenia analityczne koncentrują się wyłącznie na inicjacji. Dla $A = 1,8$ mm BS/Fat prognozował trwałość ponad 21-krotnie większą niż w badaniach – efekt

interferencji lokalnego rozmieszczenia σ_{res} i maksymalnych σ_{eqv} . Najbliższe wyniki doświadczalne uzyskała konfiguracja BS/Man (19006 vs 12 900 cykli, błąd < 30%). Modele oparte na umocnieniu Fatemi'ego systematycznie zawyżały żywotność.

Analizy wykazały kluczowy wpływ prawidłowego określenia σ_{res} na ocenę trwałości zmęczeniowej łopatki sprężarki osiowej i potwierdziły, że nie istnieje obecnie uniwersalny zestaw modeli zmęczeniowych i umocnienia cyklicznego, gwarantujący zgodność z danymi eksperymentalnymi we wszystkich warunkach, co pokrywa się z rezultatami wcześniej przeprowadzonych badań dotyczących dopasowania modeli analitycznych do wyników zmęczeniowych prób materiałowych.

Ostatnim etapem analizy wpływu obróbki powierzchniowej na trwałość zmęczeniową łopatki było wprowadzenie naprężeń szczątkowych $\sigma_{res} = -213$ MPa do obliczeń uwzględniających jednocześnie: wirowanie z prędkością 30 000 RPM, siły aerodynamiczne oraz efekt temperaturowy w zakresie od -55°C do 200°C . W warunkach czystego wirowania przy 20°C ekwiwalentne naprężenie σ_{eqv} wynosiło około 952 MPa; dodanie obciążeń aerodynamicznych zmniejszyło je do 829 MPa w niskiej temperaturze, rosło do 867 MPa w temperaturze pokojowej, a przy 200°C osiągało 966 MPa. Po uwzględnieniu σ_{res} liczba cykli do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego rozciągała się od kilkuset (najniższe 123 cykle dla kombinacji Med/Man w warunkach wirowania z aerodynamiką przy 20°C) do setek tysięcy (rekordowe 762 763 cykle uzyskane dla konfiguracji BS/Fat przy -55°C). Konfiguracja BS/Fat wykazała najwyższą trwałość, natomiast Med/Man – najniższą, co podkreśla znaczenie doboru modelu Manson–Coffin–Basquin i krzywej Ramberga–Osgooda. Dodanie obciążeń aerodynamicznych przy residualnych naprężeniach podniosło maksymalny wynik cykli siedmiokrotnie, minimalny – czterokrotnie, w porównaniu z analizami pomijającymi σ_{res} . Wyniki obliczeń zmęczeniowych, z wykorzystaniem różnych konfiguracji obciążenia, modeli materiałowych i stanu termicznego, zaprezentowano w tabeli 8.

Tab. 8. Wpływ temperatury (przy uwzględnianiu naprężeń szczątkowych) na trwałość zmęczeniową łopatki sprężarki w złożonym stanie obciążenia.

σ_{eqv}	Wirowanie		Wirowanie+Aero	
	$T = 20^{\circ}\text{C}$	$T = -55^{\circ}\text{C}$	$T = 20^{\circ}\text{C}$	$T = 200^{\circ}\text{C}$
	952	829,12	866,95	966,49
Man/Man	6470	112 184	25 324	844
Man4/Man	1866	51 537	8223	230
BS/Man	1086	31 788	4907	134
Med/Man	940	23 341	4056	123
Man/Fat	6470	112 184	25 324	844
Man4/Fat	5565	145 494	26 464	556
BS/Fat	15 032	762 763	100 336	971
Med/Fat	10 545	452 380	64 954	755
Man/Xian	2374	22 987	7203	567
Man4/Xian	1701	17 745	5268	430
BS/Xian	3885	55 349	12 962	709
Med/Xian	3658	47 788	11 621	655
Maksymalna	15 032	762 763	100 336	971
Minimalna	940	17 745	4056	123

Temperaturowa zależność trwałości zmęczeniowej jest wyraźna: w niskich temperaturach zwiększona sztywność materiału pozwala wydłużyć żywotność nawet do $0,7 \cdot 10^6$ cykli, podczas gdy przy 200°C liczba cykli spada do kilkuset, co związane jest z dominacją kruchego pęknięcia i reologicznych efektów zmęczeniowych. Uzyskane wyniki jednoznacznie pokazują, że precyzyjne określenie naprężeń szczytkowych oraz odpowiedni dobór modeli zmęczeniowych i umocnienia cyklicznego są kluczowe dla wiarygodnej oceny trwałości łopatkki sprężarki osiowej. Jednocześnie brak uniwersalnej kombinacji modeli gwarantującej najlepsze rezultaty we wszystkich warunkach wskazuje na konieczność rozszerzenia badań o mechanikę rozwoju pęknięcia aż do awarii elementu.

Jako potencjalny innych wpływ technologii wytypowano weryfikację możliwości wykorzystania druku 3D w produkcji łopatkki sprężarki silnika lotniczego. Skupiono się tu na budowie modelu materiałowego oraz wpływie orientacji druku na stan naprężenia i deformację elementu. Badania rozpoczęły się od opracowania metodyki i jej weryfikacji dla druku metodą FFF, dla próbek wykonanych z materiału PLA (rys. 15). Przeprowadzono serię badań jednoosiowego rozciągania, w ramach prac własnych habilitanta opracowany został ortotropowy model materiału Ti-6Al-4V dla próbek wykonanych technologią SLM, uzupełniony o dane izotropowe zarówno dla stopu odlewanego, jak i wydrukowanego bez uwzględnienia anizotropii. Dane literaturowe wskazują, że odlew cechuje się nieznacznie wyższą gęstością i modułem Younga, podczas gdy w kierunku przyrostowym model ortotropowy traci około 3 GPa. Wersje SLM – izotropowa i ortotropowa – mają niższą liczbę Poissona (ok. 0,32 zamiast 0,34), co przekłada się na ograniczone poprzeczne odkształcenie, wyższą sztywność objętościową i mniejszą podatność na odkształcenia plastyczne. Dodatkowo próbki SLM wykazują wyższą granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie względne przy podobnej twardości, co pozwala uzyskać komponenty o lepszych parametrach mechanicznych od odlewu, z minimalnym spadkiem modułu Younga. Efekt ortotropii materiału jest sumą wpływu właściwości materiałowych, schematu obciążenia oraz orientacji druku, analogicznie do wcześniej przeanalizowanego PLA.



Rys. 15. Próba rozciągania dla próbki wykonanej metodą FDM.

Modelowanie statycznej analizy od wirowania łopatki sprężarki osiowej wykonano dla trzech wariantów materiałowych: izotropowego odlewu, izotropowego SLM i ortotropowego SLM. Przygotowane dane materiałowe zestawiono w tabeli 9. Maksymalne naprężenia zredukowane σ_{eqv} wahają się od 652,96 MPa dla odlewu do 649,02 MPa dla izotropowego SLM, a różnice między wersjami nie przekraczają 0,6%, co czyni model izotropowy SLM podejściem konserwatywnym. Znacznie większe rozbieżności obserwuje się w przemieszczeniach: całkowite U_{sum} rośnie od 1,8789 mm (odlew) przez 1,9497 mm (izo SLM) do 2,0112 mm (orto SLM), a minimalne przemieszczenie styczne U_{tan} sięga -1,9614 mm w modelu ortotropowym. Przemieszczenia promieniowe U_{rad} rosną od 0,2180 mm (minimalnie -0,1345 mm) w odlewie, przez 0,2260 mm (-0,1396 mm) w izo SLM aż do 0,2328 mm (-0,1437 mm) w orto SLM, co oznacza niemal 7% wzrostu deformacji promieniowej. Dane z powyższej analizy przedstawiono tabelarycznie (tab. 10). Te obserwacje dowodzą, że choć anizotropia nie wpływa istotnie na rozkład głównych naprężeń, to kluczowo determinuje odkształcenia, zwłaszcza w strefach największego obciążenia. Z tego względu w dalszych etapach optymalizacji kształtu łopatki oraz w analizach zmęczeniowych zaleca się stosowanie ortotropowego modelu materiałowego, który lepiej odwzorowuje ścieżki przenoszenia obciążeń i pozwala precyzyjnie ocenić zmianę luzu wierzchołkowego oraz deformację elementu.

Tab. 9. Dane materiałowe izo i ortotropowe dla PLA i Ti-6Al-4V.

Właściwość	PLA	PLA	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V
	izo	orto	izo odlew	izo SLM	orto SLM
Gęstość ρ , kg/m ³	1300	1200	4429	4405	4405
E1, GPa	4	3,124	111,2	107	105
E2, GPa	4	2,784	111,2	107	105
E3, GPa	4	2,06	111,2	107	102
ν_1 , -	0,3	0,42	0,3387	0,323	0,32
ν_2 , -	0,3	0,379	0,3387	0,323	0,32
ν_3 , -	0,3	0,299	0,3387	0,323	0,32
G1, GPa	1	1,0389	41,533	40,438	39,772
G2, GPa	1	1,2591	41,533	40,438	39,772
G3, GPa	1	1,1746	41,533	40,438	38,636
R_e , MPa	2	1,2-2,1	845,7	850	850
R_m , MPa	37	27,5-48	918	930	930

Tab. 10. Przemieszczenia dla łopatki poddanej obciążeniom od sił bezwładności, wykonana ze stopu Ti-6Al-4V.

Ti-6Al-4V	U_{sum} mm	Max U_{rad} mm	Min. U_{rad} mm	Max U_{tan} mm	Min. U_{tan} mm
izo, odlew	1,8789	0,2180	-0,1345	0,0008	-1,8325
izo, SLM	1,9497	0,2260	-0,1396	0,0008	-1,9017
orto, SLM	2,0112	0,2328	-0,1437	0,0009	-1,9614

W kolejnym kroku analiz skupiono się na wpływie kierunku przyrostowego, co w modelu ortotropowym SLM wiąże się z orientacją najsłabszych właściwości materiału. Przyjęto siedem konfiguracji rotacji układu współrzędnych definiujących oś przyrostu kolejnych warstw: $x0y0z0$, $x30y0z30$, $x30y30z30$, $x-90y0z0$, $x-45y0z0$, $x45y0z0$ oraz $x90y90z0$. Analiza wartości naprężenia zredukowanego σ_{eqv} ujawniła, że najniższe jego maksimum wynosi 650,22 MPa dla $x-90y0z0$ (w układzie bazowym $x0y0z0$ było to 651,38 MPa), zaś pozostałe orientacje mieszczą się bardzo blisko tej wartości – od 652,01 MPa ($x45y0z0$) do 653,36 MPa ($x30y0z30$). Ekstrema naprężeń tnących τ zmieniają się w wąskim zakresie od -102,50 MPa ($x-90y0z0$) do -103,63 MPa ($x30y30z30$) dla minimalnych wartości oraz od 325,43 MPa ($x45y0z0$) do 327,17 MPa ($x30y30z30$) dla maksymalnych. Obrót o $\pm 30^\circ$ w osiach X i Y nieznacznie podnosi amplitudę τ , podczas gdy rotacja -90° obniża zarówno σ_{eqv} , jak i τ , co może sprzyjać bardziej jednorodnemu rozkładowi naprężeń. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tabeli 11.

Przemieszczenia całkowite U_{sum} okazały się bardziej wrażliwe na orientację przyrostu: najmniejsze (1,9998 mm) odnotowano dla $x90y90z0$, największe (2,0560 mm) dla $x-90y0z0$. W tej ostatniej konfiguracji składowa promieniowa U_{rad} osiąga skrajne wartości 0,2381 mm i -0,1474 mm, co stanowi wzrost amplitudy o ponad 2,2% w porównaniu do układu bazowego (0,2328 mm / -0,1437 mm). Przemieszczenie obwodowe U_{tan} pozostaje praktycznie niezmiennie we wszystkich przypadkach (0,0009 mm w górę i -1,95 - 2,00 mm w dół), z lekkim obniżeniem dodatkowo składowej do 0,0008 mm w układzie $x90y90z0$. Wartości omawianych przemieszczeń zawarto w tabeli 12.

Choć różnice σ_{eqv} są marginalne (0,1 - 0,3%), zmiany U_{sum} i U_{rad} pokazują, że orientacja przyrostu ma istotny wpływ na deformację łopatki. Rotacja -90° wokół osi X minimalizuje naprężenia, ale kosztem wzrostu przemieszczeń, natomiast $x90y90z0$ pozwala ograniczyć zarówno U_{sum} , jak i dodatkowo U_{tan} przy zachowaniu poziomu naprężeń zbliżonego do bazowego. Optymalny kompromis uzyska się przez niewielkie obroty rzędu $30 - 45^\circ$, które stabilizują zachowanie mechaniczne bez istotnego pogorszenia żadnej z monitorowanych wielkości.

Tab. 11. Wpływ orientacji druku (tożsamego z kierunkiem przyrostowym w druku SLM) na naprężenia w łopatce wykonanej z materiału Ti-6Al-4V.

Ti-6Al-4V orto, SLM	Max σ_{eqv} MPa	Min. τ MPa	Max τ MPa
$x0y0z0$	651,38	-102,92	326,11
$x30y0z30$	653,36	-103,16	326,85
$x30y30z30$	653,33	-103,63	327,17
$x-90y0z0$	650,22	-102,50	326,38
$x-45y0z0$	653,08	-103,03	326,44
$x45y0z0$	652,01	-103,19	325,43

Tab. 12. Wpływ orientacji druku (tożsamego z kierunkiem przyrostowym w druku SLM) na przemieszczenia w łopatkce wykonanej z materiału Ti-6Al-4V.

Ti-6Al-4V orto, SLM	U_{sum} mm	Max U_{rad} mm	Min. U_{rad} mm	Max U_{tan} mm	Min. U_{tan} mm
x0y0z0	2,0112	0,2328	-0,1437	0,0009	-1,9614
x30y0z30	2,0003	0,2318	-0,1430	0,0009	-1,9509
x30y30z30	2,0040	0,2320	-0,1431	0,0009	-1,9544
x-90y0z0	2,0560	0,2381	-0,1474	0,0009	-2,0054
x-45y0z0	2,0169	0,2341	-0,1446	0,0009	-1,9677
x45y0z0	2,0172	0,2333	-0,1440	0,0009	-1,9670
x90y90z0	1,9998	0,2318	-0,1430	0,0008	-1,9506

Ostatnim etapem prac była analiza modalna dla wybranej konfiguracji druku x30y0z30. Pierwsza postać drgań, giętna, jak w eksperymentach opisanych w rozdziale dotyczącym rezonansu, występuje przy częstotliwości 818,74 Hz w modelu izotropowym oraz 795,03 Hz w ortotropowym. Różnice w sześciu badanych postaciach modalnych sięgają od -2,72% do -2,90% przy przejściu od izotropii do ortotropii, co wynika z obniżenia modułu Younga w osiach X i Z oraz zmiany gęstości materiału w równaniu częstotliwości rezonansowych. Wyniki analizy modalnej łopatkki sprężarki osiowej dla dwóch różnych materiałów (izo i ortotropowy) zestawioo w tabeli 13. Wyniki potwierdzają, że choć anizotropia SLM nie wpływa znacząco na rozkład głównych naprężeń, to ukazuje prawdziwe ścieżki przenoszenia obciążeń, ujawnia większe przemieszczenia i obniża częstotliwości własne. Dlatego w kolejnych etapach optymalizacji kształtu oraz analizie zmęczeniowej rekomenduje się model ortotropowy SLM z kontrolą orientacji przyrostu, aby uzyskać wiarygodne przewidywania odkształceń, luzu wierzchołkowego i charakterystyki dynamicznej łopatkki.

Tab. 13. Wpływ orientacji druku (tożsamego z kierunkiem przyrostowym w druku SLM) na częstotliwości rezonansowe łopatkki z materiału Ti-6Al-4V.

Częstotliwości rezonansowe	Model izo, odlew Hz	Model orto, SLM (x30y0z30) Hz
I postać	818,74	795,03
II postać	2524,2	2454,9
III postać	3465,2	3370,9
IV postać	6345,3	6167,8
V postać	7468,2	7252,3
VI postać	8352,8	8112

W wyniku przeprowadzenia omówionych powyżej badań, udało się po części wypełnić luki badawcze, które zdefiniowano w ramach przeglądu literatury. Oceniono, że konieczne są dalsze prace nad wyprowadzeniem modelu materiałowego, który lepiej odzwierciedli zmieniające się zachowanie materiału pod wpływem obciążeń termicznych. Badania wykazały również potencjał kryjący się za wykorzystaniem materiału ortotropowego w druku 3D, co byłoby niezbędne w etapie certyfikacji produktów lotniczych wykonanych tą technologią.

4.3. Artykuły naukowe wchodzące w skład cyklu publikacji i jego charakterystyka

W cykl publikacji, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2c ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) wchodzi 9 pozycji dotyczących wytrzymałości zmęczeniowej łopatki sprężarki osiowej i wirników sprężarki odśrodkowej. Badania skupiają się na wytrzymałości materiałów oraz sprawności i efektywności pracy omawianych maszyn wirnikowych (w oparciu o analizy CFD). W 4 artykułach z cyklu publikacji jestem jedynym autorem (100% udział w publikacji).

- [A1] Bednarz A.: "*Influence of the cyclic hardening model on the results of the numerical analysis of fatigue life on example of the compressor blade*", Journal of Kones Vol. 26, No. 2 (2019), strony: 7-14. **IF: brak danych; Punkty MNiSW/MEiN: 7 (załącznik 5.2).**

W artykule pt. "*Influence of the cyclic hardening model on the results of the numerical analysis of fatigue life on example of the compressor blade*", opublikowanym w czasopiśmie Journal of KONES (Vol. 26, No. 2, 2019), przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu modelu umacniania cyklicznego na prognozowanie trwałości zmęczeniowej łopatki sprężarki silnika lotniczego. Celem pracy było wykazanie, jak istotny wpływ na dokładność analiz zmęczeniowych ma wybór odpowiedniego modelu konstytutywnego materiału, szczególnie w kontekście obciążeń cyklicznych.

Do badań wykorzystano łopatkę sprężarki silnika PZL-10W wykonaną ze stopu EI961, w której zasymulowano defekt w postaci karbu typu V na krawędzi natarcia. Taka konfiguracja pozwoliła mi na analizę inicjacji pęknięcia w obszarze najbardziej narażonym na koncentrację naprężeń. Przeprowadzono analizę numeryczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES), porównując dwa podejścia: klasyczny model sprężysty oraz model uwzględniający zjawisko umacniania cyklicznego.

Wnioski z przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują, że nieuwzględnienie umacniania cyklicznego prowadzi do niedoszacowania wartości naprężeń i odkształceń w obszarze defektu, co może skutkować błędną oceną trwałości zmęczeniowej. Zastosowanie bardziej zaawansowanego modelu materiałowego pozwala na uzyskanie wyników bliższych rzeczywistości, co ma kluczowe znaczenie w projektowaniu i certyfikacji elementów lotniczych narażonych na cykliczne obciążenia.

W pracy zastosowano następujące metody badawcze:

- modelowanie geometrii łopatki z defektem w środowisku CAD,
- implementację modeli konstytutywnych w analizie MES,
- analizę rozkładu naprężeń i odkształceń w cyklu obciążeniowym,
- ocenę trwałości zmęczeniowej metodą ϵ -N.

Publikacja ta stanowi wkład w rozwój metod numerycznych stosowanych w analizie zmęczeniowej komponentów lotniczych. Pokazuje, że precyzyjne odwzorowanie właściwości materiałowych w warunkach cyklicznych obciążeń jest niezbędne dla wiarygodnych prognoz trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji. Wyniki badań mogą być wykorzystane w dalszych pracach nad integracją zaawansowanych modeli materiałowych w procesie projektowania i certyfikacji elementów silników lotniczych.

Jako jedyny autor niniejszej publikacji, oświadczam 100% udział w przeprowadzeniu badań, przygotowaniu i napisaniu.

- [A2] Bednarz A.: "*Evaluation of Material Data to the Numerical Strain-Life Analysis of the Compressor Blade Subjected to Resonance Vibrations*", Advances in Science and Technology Research Journal 14(1), (2020), strony: 184–190. **IF: 1,3; Punkty MNiSW/MEiN: 100 (załącznik 5.3).**

Moim celem było zweryfikowanie, w jakim stopniu jakość i wybór danych materiałowych wpływa na wyniki numerycznej analizy strain-life dla łopatki sprężarki poddanej drganiom rezonansowym. Postawiono hipotezę, że różnice w parametrach materiałowych używanych w modelach konstytutywnych oraz w modelach zmęczeniowych prowadzą do istotnych rozbieżności w prognozowanej żywotności, a tym samym wpływają na wiarygodność oceny bezpieczeństwa eksploatacyjnego elementu.

Przeprowadzono analizę numeryczną wykorzystując model łopatki pierwszego stopnia sprężarki PZL-10W z wstępnie zdefiniowanym karbem geometrycznym na krawędzi natarcia. Zastosowano metodę elementów skończonych do wyznaczenia rozkładów naprężeń i odkształceń wywołanych drganiami rezonansowymi. Wykorzystano zestaw różnych danych materiałowych obejmujących parametry sprężysto-plastyczne, krzywe zmęczeniowe ϵ -N oraz parametry opisujące umacnianie cykliczne. Przeprowadzono porównawcze obliczenia żywotności przy użyciu ośmiu metod oceny zmęczeniowej opartych na modelu Manson-Coffin-Basquin, co pozwoliło na ocenę czułości wyników na warianty danych wejściowych.

Wyniki wykazały wyraźną wrażliwość prognoz trwałości na szczegóły danych materiałowych. Różnice w parametrach umacniania cyklicznego, granicy plastyczności i parametrach krzywej ϵ -N powodowały znaczące odchylenia w przewidywanej liczbie cykli do inicjacji pęknięcia. Zidentyfikowano obszary o największym wpływie na wyniki, w tym lokalne pola odkształceń przy karbie oraz wartości parametrów determinujących zachowanie w reżimach dużych odkształceń. Porównanie metod oceny zmęczeniowej ujawniło, że metody uwzględniające pełne informacje o umacnianiu cyklicznym i histerezie materiału dostarczały bardziej konserwatywnych i spójnych wyników.

Główną konkluzją utworzoną po przeprowadzeniu opisanych badań jest to, że rzetelność numerycznej analizy strain-life dla łopatek sprężarek pracujących w warunkach rezonansu jest silnie uzależniona od jakości i kompletności danych materiałowych. Stosowanie uproszczonych lub niezwyfikowanych parametrów może prowadzić do przeszacowania trwałości i błędnych decyzji projektowych. Zalecam stosowanie ustandaryzowanych procedur doboru i walidacji danych materiałowych przed ich użyciem w analizach trwałościowych oraz integrację testów eksperymentalnych z obliczeniami numerycznymi w celu kalibracji modeli.

Jako jedyny autor niniejszej publikacji, oświadczam 100% udział w przeprowadzeniu badań, przygotowaniu i napisaniu.

- [A3] Bednarz A.: "*Influence of the Amplitude of Resonance Vibrations on Fatigue Life of a Compressor Blade with Simulated FOD Damage*", Advances in Science and Technology

Research Journal 14(3), (2020), strony: 22-29. **IF: 1,3; Punkty MNiSW/MEiN: 100 (załącznik 5.4).**

W artykule „*Influence of the Amplitude of Resonance Vibrations on Fatigue Life of a Compressor Blade with Simulated FOD Damage*”, opublikowanym w *Advances in Science and Technology Research Journal* (Vol. 14, No. 3, 2020, s. 22–29), przedstawiono wyniki badań numerycznych dotyczących wpływu amplitudy drgań rezonansowych na trwałość zmęczeniową łopatki sprężarki obciążonej defektem powstałym w wyniku uderzenia ciała obcego (FOD). Celem pracy było ilościowe określenie, jak zmiana amplitudy drgań rezonansowych modyfikuje liczbę cykli do inicjacji pęknięcia i prognozowaną liczbę cykli do uszkodzenia w obecności geometrycznego karbu na krawędzi natarcia.

Celem głównym pracy było ocenić wpływ amplitudy drgań rezonansowych na żywotność łopatki sprężarki z symulowanym uszkodzeniem FOD. Jako cel szczegółowy można było wyróżnić: określenie pola naprężeń i odkształceń wokół karbu przy różnych poziomach amplitudy, zidentyfikowanie mechanizmy koncentracji odkształceń prowadzące do inicjacji pęknięcia oraz ocenę czułości wyników analizy strain-life na wybór parametrów obciążeniowych.

Wykonano model geometryczny pierwszego stopnia łopatki sprężarki PZL-10W z wprowadzonym karbem typu V, odwzorowującym uszkodzenie FOD. Przeprowadzono analizę dynamiczną wywołaną drganiami rezonansowymi przy kilku poziomach amplitudy odpowiadających warunkom eksploatacyjnym. Do analiz użyto metody elementów skończonych (MES) z analizą modalną i harmoniczną w celu określenia lokalnych pól naprężeń i odkształceń w cyklu. Oceny trwałości zmęczeniowej dokonano metodą strain-life (ϵ -N) z uwzględnieniem efektów umacniania cyklicznego i lokalnej koncentracji odkształceń.

Uzyskane wyniki wykazały wyraźną zależność liczby cykli do inicjacji pęknięcia od amplitudy drgań rezonansowych. Zwiększenie amplitudy prowadziło do istotnego wzrostu lokalnych odkształceń przy karbie oraz przesunięcia pola maksymalnych naprężeń w głąb materiału, co skracało przewidywaną żywotność. Wskazano progi amplitudy, powyżej których tempo akumulacji uszkodzeń rośnie nieliniowo, oraz obszary najbardziej wrażliwe na zwiększone drgania. Porównanie wyników przy różnych scenariuszach obciążeniowych potwierdziło, że pominięcie rzeczywistej amplitudy rezonansowej prowadzi do zawyżenia odporności komponentu.

Jako jedyny autor niniejszej publikacji, oświadczam 100% udział w przeprowadzeniu badań, przygotowaniu i napisaniu.

- [A4] Bednarz A., Misiolek W.Z.: „*Assessment of the Impact of Shot-Peening on the Fatigue Life of a Compressor Blade Subjected to Resonance Vibrations*”, *Materials* 2020, 13, 5726; doi:10.3390/ma13245726. **IF: 3,623 (JCR 2020); Punkty MNiSW/MEiN: 140 (załącznik 5.5).**

W artykule pt. „*Assessment of the Impact of Shot-Peening on the Fatigue Life of a Compressor Blade Subjected to Resonance Vibrations*” opublikowanym w *Materials* przedstawiono kompleksową ocenę wpływu obróbki powierzchniowej typu shot-peening na trwałość zmęczeniową łopatki sprężarki pracującej w warunkach drgań

rezonansowych; artykuł ukazał się 15 grudnia 2020 roku i posiada numer DOI 10.3390/ma13245726.

Głównym celem pracy było ilościowe określenie, w jaki sposób wprowadzenie warstwy naprężeń ściskających wynikających ze shot-peeningu modyfikowało pola naprężeń, rozkład odkształceń i przewidywaną liczbę cykli do inicjacji pęknięcia dla geometrii łopatki z lokalnym uszkodzeniem FOD. Dążono do wskazania, czy i w jakim zakresie shot-peening może zwiększyć bezpieczeństwo eksploatacyjne elementu pracującego w zbliżonych do rezonansu warunkach.

Przygotowano szczegółowy model geometryczny łopatki sprężarki z wstępnym karbem na krawędzi natarcia i zastosowano analizę modalną oraz harmoniczną przy użyciu metody elementów skończonych w celu określenia pól dynamicznych dla rezonansowych stanów drgań. Wprowadzono do modelu pola naprężeń resztkowych wynikających z procesu shot-peeningu oraz uwzględniono wpływ warstwy zniekształconej powierzchniowo na lokalne właściwości mechaniczne. Oceny trwałości wykonano metodą strain-life (ϵ -N) z uwzględnieniem umacniania cyklicznego i lokalnej koncentracji odkształceń. Wyniki porównywano dla wariantów: bez shot-peeningu, ze standardowym natężeniem kulowania oraz z wariantami o różnej głębokości i intensywności zabiegu.

Analizy wykazały, że shot-peening wprowadzał istotne naprężenia ściskające w warstwie powierzchniowej, co skutkowało przesunięciem miejsca maksymalnego pola odkształceń w głąb materiału oraz znacznym zmniejszeniem amplitudy zmiennych odkształceń na powierzchni przy danej amplitudzie drgań rezonansowych. Warianty z odpowiednio dobranym natężeniem peeningu dostarczały wyraźnie wydłużonej przewidywanej liczby cykli do inicjacji pęknięcia w porównaniu z przypadkiem referencyjnym bez obróbki. Zidentyfikowano jednocześnie przypadki, w których nadmierna głębokość lub nieoptymalna amplituda peeningu mogła prowadzić do lokalnego pogorszenia właściwości zmęczeniowych, co wskazywało na konieczność optymalizacji parametrów procesu.

Wnioskuje, że shot-peening może być efektywną metodą poprawy trwałości łopatek sprężarek narażonych na drgania rezonansowe, pod warunkiem starannego doboru parametrów procesu i uwzględnienia efektów dynamicznych w analizie numerycznej. Praca podkreśla konieczność integrowania symulacji pola naprężeń resztkowych z analizami dynamicznymi i zmęczeniowymi oraz dostarcza praktycznych wskazówek dotyczących zakresów parametrów peeningu, które powinny być weryfikowane eksperymentalnie.

W omawianej publikacji, będącej efektem współpracy z prof. Misiołkiem z Lehigh University, odpowiadałem za: przygotowanie danych materiałowych, przygotowanie próbek, przeprowadzenie badań materiałowych, obróbka wyników z badań mikroskopowych oraz napisanie artykułu.

Współautor odpowiadał za: wsparcie procesu recenzyjnego, ocenę wyników badań materiałowych oraz weryfikację przeglądu literatury.

- [A5] Bednarz A., Misiolek W.Z.: „*Numerical and Experimental Assessment of the Effect of Residual Stresses on the Fatigue Strength of an Aircraft Blade*”; Materials 2021, 14, 5279; doi:10.3390/ma14185279. **IF: 3,748 (JCR 2021); Punkty MNiSW/MEiN: 140 (załącznik 5.6).**

W artykule „*Numerical and Experimental Assessment of the Effect of Residual Stresses on the Fatigue Strength of an Aircraft Blade*” (Materials 2021, 14, 5279; doi:10.3390/ma14185279) przedstawiono kompleksowe badania numeryczne i eksperymentalne dotyczące wpływu naprężeń resztkowych, pochodzących głównie z procesu shot-peening, na odporność zmęczeniową łopatkki sprężarki.

Moim głównym celem było ilościowe określenie, w jakim stopniu rzeczywiste pola naprężeń resztkowych modyfikują lokalne pola odkształceń i wpływają na przewidywaną liczbę cykli do inicjacji pęknięcia. Założono, że wprowadzone naprężenia ściskające mogą znacząco wydłużyć żywotność, lecz podlega to zmianie wskutek relaksacji naprężeń podczas obróbki i eksploatacji, co wymaga empirycznej weryfikacji powiązania pomiarów z modelami numerycznymi.

Połączono pomiary naprężeń resztkowych uzyskane metodą dyfrakcji rentgenowskiej z analizami numerycznymi opartymi na metodzie elementów skończonych. Przygotowano model geometryczny łopatkki z uwzględnieniem lokalnego defektu FOD oraz sekwencji obróbki powodującej relaksację naprężeń (cięcie, wykończenie). W modelu uwzględniono wstępne pola naprężeń resztkowych jako warunek początkowy i przeprowadzono analizy dynamiczne i zmęczeniowe metodą strain-life (ϵ -N) z uwzględnieniem umacniania cyklicznego. Eksperymentalnie zmierzono rozkład naprężeń po peeningu oraz ich zmiany po operacjach obróbczych, co pozwoliło na kalibrację i walidację modelu numerycznego.

Wykazano, że wprowadzone naprężenia ściskające istotnie obniżały amplitudę odkształceń powierzchniowych w obszarze krytycznym, przesuując maksimum efektów uszkodzeniowych w głąb materiału i wydłużając przewidywaną liczbę cykli do inicjacji pęknięcia. Jednocześnie potwierdzono, że procesy obróbcze powodowały częściową relaksację naprężeń resztkowych, co zmniejszało korzystny wpływ peeningu i wymagało uwzględnienia tych zmian w analizach trwałości. Kalibracja modelu danymi pomiarowymi poprawiła zgodność prognoz numerycznych z obserwacjami eksperymentalnymi.

Wnioskuje, że wiarygodna prognoza wpływu naprężeń resztkowych na trwałość zmęczeniową wymaga połączenia rzetelnych pomiarów (np. dyfrakcja rentgenowska) z analizami numerycznymi, które uwzględniają relaksację naprężeń w kolejnych etapach obróbki i eksploatacji. Sam peening może znacząco poprawić odporność, ale tylko jeżeli jego efekty przetrwają operacje technologiczne i warunki cykliczne. Zalecam włączenie etapów pomiarowych i kalibracyjnych do procedur projektowych oraz uwzględnienie

Praca dostarczyła praktycznych wytycznych dotyczących integracji pomiarów naprężeń resztkowych z analizami zmęczeniowymi i pokazała, które etapy procesu technologicznego mają największy wpływ na skuteczność powierzchniowych metod

poprawy trwałości. Wyniki są przydatne dla projektantów, inżynierów procesu oraz specjalistów zajmujących się oceną trwałości i certyfikacją części turbomechanicznych.

W omawianej publikacji, będącej efektem współpracy z prof. Misiółkiem z Lehigh University, odpowiadałem za: przygotowanie danych materiałowych, ocenę wyników badań materiałowych, obróbka wyników oraz napisanie artykułu.

Współautor odpowiadał za: wsparcie procesu recenzyjnego, przeprowadzenie badań materiałowych oraz weryfikację przeglądu literatury.

- [A6] Bednarz A.: "*Wpływ obciążeń aerodynamicznych na częstotliwość rezonansową sprężarki osiowej*" [w:] Współczesne wyzwania transportu i elektrotechniki. Tom 2, 2021 Radom, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, ISBN: 978-83-7351-933-6. **IF: nie dotyczy; Punkty MNiSW/MEiN: 20 (załącznik 5.7).**

W rozdziale „*Wpływ obciążeń aerodynamicznych na częstotliwość rezonansową sprężarki osiowej*” zawartym w monografii *Współczesne wyzwania transportu i elektrotechniki. Tom 2* (Radom 2021) przedstawiono analizę zależności pomiędzy zmianami obciążeń aerodynamicznych działających na stopień sprężarki osiowej a przesunięciem jego częstotliwości rezonansowej oraz implikacjami tego zjawiska dla bezpieczeństwa eksploatacji i diagnostyki drgań.

Moją intencją było ilościowe i jakościowe określenie, w jaki sposób zmienne pola aerodynamiczne wynikające z warunków pracy silnika, zmian przepływu i występowania niestabilnych zjawisk modyfikują wartości częstotliwości własnych stopnia sprężarki. Postawiono hipotezę, że zmiany obciążenia aerodynamicznego wpływają nie tylko na amplitudy wymuszeń, ale też na efektywną sztywność układu wirnik-stator i w konsekwencji na częstotliwości rezonansowe, co ma znaczenie dla oceny ryzyka pracy w rezonansu.

Przeprowadzono analizę łączącą podejście teoretyczne z obliczeniami numerycznymi. Opracowano model dynamiczny stopnia sprężarki uwzględniający wpływ aerodynamicznego obciążenia jako zmiennego pola nacisków działających na łopatki. Wykonano analizę modalną dla kilku scenariuszy pracy (różne współczynniki obciążenia, zmiany prędkości przepływu, zjawiska niestabilne), porównując częstotliwości własne i postacie drgań. W analizach uwzględniono efekt sprzężenia fluido-strukturalnego w przybliżonym zakresie poprzez zmiany warunków brzegowych i równoważne modyfikacje sztywności układu.

Wyniki wykazały, że zmiana obciążenia aerodynamicznego prowadziła do zauważalnych przesunięć częstotliwości własnych stopnia sprężarki. Efekt ten był zależny od rozkładu ciśnień na łopatkach oraz od stopnia niejednorodności przepływu; w warunkach asymetrycznego obciążenia obserwowano większe przesunięcia i lokalne zmiany kształtu postaci drgań. Wskazano progi obciążeniowe, przy których częstotliwość rezonansowa zbliżała się do pasm wymuszeń typowych dla pracy turbiny, co zwiększało ryzyko wejścia w rezonans. Pokazano też, że tradycyjne analizy modalne przeprowadzone dla warunków statycznych mogą niedoszacować ryzyka, jeśli pomijają zmienność aerodynamiczną.

Wnioskuje, że dla rzetelnej oceny ryzyka rezonansu w sprężarkach konieczne jest uwzględnianie wpływu obciążeń aerodynamicznych na pola sztywności i masy efektywnej układu. Zalecono włączenie scenariuszy zmiennego obciążenia do procedur diagnostycznych i prób rezonansowych oraz rozważenie monitoringu parametrów aerodynamicznych jako uzupełnienia systemów wykrywających zbliżanie się do warunków rezonansowych. Wyniki mają praktyczne zastosowanie w projektowaniu bezpieczniejszych układów sterowania pracą sprężarki, w planowaniu prób rezonansowych oraz w podejściu do konserwacji predykcyjnej.

Jako jedyny autor niniejszej publikacji, oświadczam 100% udział w przeprowadzeniu badań, przygotowaniu i napisaniu.

- [A7] Bednarz A., Sęp J., Bartłomowicz R., Jaworski J., Wójcik A.: "*Analysis of the effects of simplifications on the state of loads in a centrifugal compressor*", Scientific Reports, volume 12,16892 (2022). IF: 3,9 (JCR 2022); Punkty MNiSW/MEiN: 140 (załącznik 5.8).

Omawiana praca była efektem:

- realizacji projektu z WUCH Dębica (prof. Sęp, mgr inż. Wójcik)
- współpracy z prof. Jaworskim z Lehigh University
- realizacji pracy inżynierskiej mgr inż. Rafała Bartłomowicza

Moim głównym zamiarem było porównanie wyników uzyskanych przy modelach o różnym stopniu złożoności, aby wskazać praktyczne wytyczne dla inżynierów modelujących sprężarki przemysłowe i chłodnicze. Postawiono hipotezę, że pewne powszechnie stosowane uproszczenia mogą prowadzić do systematycznych błędów w ocenie stanów naprężeń i rozkładów sił, co ma bezpośrednie przełożenie na ocenę bezpieczeństwa i żywotności elementów.

Przeprowadzono zestaw obliczeń numerycznych łączących analizę CFD z analizą strukturalną metodą elementów skończonych. Opracowano kilka wariantów modelu sprężarki odśrodkowej różniących się stopniem szczegółowości: uproszczona geometria kierownic i łopatek, pełna geometria kanałów dyfuzora, różne warunki brzegowe przepływu oraz różne podejścia do sprzężenia przepływowo-strukturalnego. Każdy wariant poddawano analizie pola ciśnień, sił aerodynamicznych oraz wynikowej odpowiedzi strukturalnej, porównując maksima naprężeń, lokalizacje koncentracji obciążeń oraz globalne rozkłady sił.

Wykazano, że uproszczenia geometryczne dotyczące kształtu kanałów dyfuzora i krawędzi łopatek istotnie zmieniały lokalne pola ciśnienia i sił aerodynamicznych, a w konsekwencji przesunęły miejsca maksymalnych naprężeń w strukturze wirnika i obudowy. Uproszczenia warunków brzegowych i zaniedbanie efektów trójwymiarowego przepływu prowadziły do niedoszacowania wartości sił osiowych i promieniowych w krytycznych obszarach. Wyniki ujawniły też, że częściowe sprzężenie CFD-FE może dawać akceptowalne przybliżenia dla pewnych zastosowań, lecz w przypadkach bliskich granicy pracy sprężarki konieczne było pełne sprzężenie w celu zachowania poprawności ocen.

Wnioskuje, że dobór poziomu uproszczeń modelu powinien być uzależniony od celu analizy: do ogólnej oceny wydajności można stosować uproszczenia, jednak przy ocenie stanów naprężeń, żywotności czy ryzyka rezonansów wymagane są bardziej rozbudowane modele. Zalecono zakresy uproszczeń akceptowalnych w praktyce inżynierskiej oraz kryteria decydujące o konieczności stosowania pełnych modeli sprzężonych. Podkreślono znaczenie walidacji modeli uproszczonych względem modeli referencyjnych oraz pomiarów eksperymentalnych.

Praca dostarczyła praktycznych wskazówek dla inżynierów projektujących i analizujących sprężarki odśrodkowe, pokazując które uproszczenia są bezpieczne, a które mogą prowadzić do błędnych decyzji projektowych. Wyniki mają zastosowanie w optymalizacji procesu modelowania w kontekście ograniczeń obliczeniowych oraz w procedurach weryfikacji modelu przed jego użyciem do ocen bezpieczeństwa i trwałości komponentów.

W omawianej publikacji, będącej efektem współpracy z naukowcami z Politechniki Rzeszowskiej i z Lehigh University (USA), studentem i przedstawicielem przemysłu, odpowiadałem za: konceptualizację tematu, ocenę wyników, koordynowanie i weryfikację obliczeń numerycznych oraz napisanie części artykułu (wraz z prowadzeniem procesu recenzyjnego). Za resztę prac odpowiadali współautorzy.

- [A8] Bednarz A., Puchała K., Sałaciński M., Hutsaylyuk V.: *“Numerical Investigation of the Influence of Aerodynamic Loads on the Resonant Frequency of a Compressor Blade Made of EI-961 Alloy”*, Materials 15 (23), 8391. **IF: 3,4 (JCR 2022); Punkty MNiSW/MEiN: 140 (załącznik 5.9).**

W artykule *„Numerical Investigation of the Influence of Aerodynamic Loads on the Resonant Frequency of a Compressor Blade Made of EI-961 Alloy”* (Materials 15 (23), 8391, 2022) przedstawiono wyniki badań numerycznych dotyczących wpływu obciążeń aerodynamicznych na częstotliwości rezonansowe łopatki sprężarki wykonanej ze stopu EI-961. Celem pracy było ilościowe określenie, w jaki sposób zmienne rozkłady ciśnień aerodynamicznych modyfikują efektywną sztywność układu wirnik-stator oraz przesuwają częstotliwości własne i postacie drgań, co ma bezpośrednie przełożenie na ryzyko wejścia w rezonans podczas eksploatacji.

Postawiono hipotezę, że rzeczywiste pola aerodynamiczne, w tym asymetrie przepływu i zmiany współczynnika obciążenia, wpływają nie tylko na amplitudy wymuszeń, ale także na efektywną sztywność struktury łopatki, prowadząc do przesunięć częstotliwości własnych. Dążono do identyfikacji zakresów obciążeń, przy których przesunięcia te stają się istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacyjnego oraz do wskazania wrażliwych obszarów geometrycznych i warunków pracy.

Wykonano szczegółowe symulacje numeryczne łączące modele aerodynamiczne z analizami modalnymi struktury łopatki. Opracowano model 3D łopatki wykonanej ze stopu EI-961, uwzględniono różne stany obciążenia aerodynamicznego odpowiadające zakresom pracy sprężarki oraz przypadki asymetrycznych pól ciśnień. Przeprowadzono analizę modalną dla każdego scenariusza, badając zmiany częstotliwości własnych i postaci drgań. Wybór materiału i jego właściwości mechanicznych uwzględniono

zgodnie z danymi literaturowymi i typowymi parametrami stosowanymi w konstrukcjach lotniczych. Analizy obejmowały także badanie czułości wyników na przyjęte warunki brzegowe i modele obciążeń, aby wyodrębnić najbardziej wpływowe czynniki.

Wyniki pokazały, że zmiany obciążeń aerodynamicznych powodowały zauważalne przesunięcia częstotliwości rezonansowych, przy czym efekt był silniej wyrażony w scenariuszach asymetrycznych i przy wyższych współczynnikach obciążenia. Zidentyfikowano, że lokalne koncentracje ciśnień na krawędziach łopatek i w pobliżu korzenia wpływały na modyfikację efektywnej sztywności, co przekładało się na zmiany częstotliwości własnych rzędu kilku procent w porównaniu z analizami wykonywanymi dla warunków statycznych. Dla niektórych konfiguracji obciążeń zaobserwowano przesunięcia wystarczające, by zbliżyć częstotliwość własną do pasm wymuszeń typowych dla pracy urządzenia, co podniosło ryzyko wejścia w rezonans.

Wnioskuję, że rzetelna ocena ryzyka rezonansu wymaga uwzględnienia wpływu obciążeń aerodynamicznych na pola sztywności i masy efektywnej układu. Tradycyjne analizy modalne przeprowadzane dla warunków statycznych mogą nie odzwierciedlać rzeczywistych częstotliwości własnych podczas pracy w zmiennych warunkach przepływowych. Zalecam włączenie scenariuszy aerodynamicznych do procedur prób rezonansowych, stosowanie analizy czułości oraz rozważenie monitoringu parametrów aerodynamicznych w systemach diagnostyki drgań. Wyniki pracy mają zastosowanie w projektowaniu bezpieczniejszych układów sprężarek, planowaniu prób rezonansowych oraz w podejściu do konserwacji predykcyjnej.

W omawianej publikacji, będącej efektem współpracy z naukowcami z Wojskowej Akademii Technicznej oraz Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, byłem odpowiedzialny za konceptualizację badań, przeprowadzenie analiz numerycznych, ocenę wyników i pisanie artykułu.

Współautorzy wsparli: obróbkę wyników, pisanie artykułu, przygotowanie rysunków oraz proces recenzyjny.

- [A9] Bednarz A., Kabalyk K., Jakubowski R., Bartłomowicz R.: *“Numerical study on sensitivity of turbofan engine performance to blade count of centrifugal compressor impeller”*; Energies 16 (14), 5251. **IF: 3,0 (JCR 2023); Punkty MNiSW/MEiN: 140 (załącznik 5.10).**

W artykule *„Numerical study on sensitivity of turbofan engine performance to blade count of centrifugal compressor impeller”* (Energies 16(14), 5251, 2023) przeprowadzono systematyczne badanie numeryczne w celu oceny wpływu liczby łopatek wirnika sprężarki odśrodkowej na parametry pracy silnika turbowentylatorowego oraz na charakterystyki aerodynamiczne i mechaniczne sprężarki.

Jako cel główny powyższej publikacji ustalono określić czułość wydajności jednostki napędowej oraz lokalnych wielkości obciążeniowych względem zmian liczby łopatek wirnika sprężarki odśrodkowej. Celem szczegółowym było zidentyfikować wpływ zmiany liczby łopatek na pole ciśnień, strumień przepływu, efekty osiowe i promieniowe sił aerodynamicznych oraz potencjalne konsekwencje dla trwałości i stabilności pracy sprężarki.

Przyjęto podejście numeryczne oparte na sprzężonym cyklu analiz CFD i analiz strukturalnych. Opracowano kilka wariantów wirnika różniących się liczbą łopatek przy zachowaniu tej samej powierzchni przepływu i geometrii podstawowej. Dla każdego wariantu przeprowadzono:

- obliczenia pola prędkości i ciśnienia w całym kanale sprężarki metodą CFD z uwzględnieniem warunków brzegowych typowych dla silników dwuprzepływowych z wentylatorem,
- ekstrakcję sił aerodynamicznych działających na łopatki i przekazanie ich do analizy strukturalnej w formie obciążeń statycznych i harmonicznych,
- ocenę wpływu na parametry silnika systemowo, w tym zmianę sprężu, przepływu masowego i sprawności sprężarki, przy użyciu zintegrowanego modelu cyklu napędowego.

W analizach przeprowadzono także porównanie wskaźników ryzyka drgań i możliwych zmian w polach naprężeń wynikających z modyfikacji liczby łopatek.

Stwierdzono, że zmiana liczby łopatek wpływała istotnie na rozkład pola ciśnień w kanale dyfuzora oraz na charakterystykę strumienia międzyłopatkowego. Zwiększenie liczby łopatek prowadziło do wygładzenia pola ciśnień i zmniejszenia lokalnych skoków ciśnienia, co w wielu przypadkach poprawiało stabilność pracy i redukowało amplitudy sił okresowych. Zmniejszenie liczby łopatek powodowało koncentrację przepływu w przestrzeniach międzyłopatkowych, wzrost lokalnych gradientów ciśnienia oraz umiarkowane obniżenie sprawności przy określonych warunkach obciążenia. Przeniesienie uzyskanych pól sił do analiz strukturalnych ujawniło, że warianty z mniejszą liczbą łopatek generowały wyższe lokalne naprężenia i większą zmienność obciążeń, co mogło przełożyć się na skrócenie przewidywanej żywotności przy zbliżonych warunkach eksploatacyjnych.

Wnioskuje, że liczba łopatek wirnika jest istotnym parametrem projektowym wpływającym nie tylko na charakterystykę aerodynamiczną sprężarki, lecz także na jej aspekty mechaniczne i żywotnościowe. Optymalizacja liczby łopatek wymaga kompromisu między sprawnością, stabilnością przepływu i ograniczeniem lokalnych obciążeń mechanicznych. Zalecam uwzględnienie tych zależności już na etapie projektowania systemowego silnika oraz przeprowadzenie walidacji eksperymentalnej przy wybranych wariantach.

Praca dostarcza inżynierom praktycznych wskazówek dotyczących wpływu modyfikacji geometrii wirnika na parametry układu napędowego i ryzyko eksploatacyjne. Wyniki mogą być wykorzystane w procesie projektowania sprężarek odśrodkowych dla silnik turbowentylatorowych, w analizach optymalizacyjnych oraz przy podejmowaniu decyzji o kompromisach projektowych między osiąganymi a trwałością.

Omawiana praca była niejako kontynuacją aktywności podjętych w ramach publikacji [A7]. Mój wkład w publikację obejmował: konceptualizację, obróbkę wyników, pisanie i proces recenzyjny.

4.4. Charakterystyka oryginalnych osiągnięć projektowe

Pomiędzy majem 2021 a lipcem 2022 realizowałem (jako wnioskodawca, lider zespołu i wykonawca – zespół 5 osobowy) autorski projekt „*Turboalternator lotniczy zintegrowany z bębniem/wałem i statorem sprężarki*” (nr 10/I/2021) w ramach programu „*Inkubator Innowacyjności 4.0*” (**załącznik 5.11**). Celem programu „*Inkubator Innowacyjności 4.0*” było wsparcie procesu zarządzania wynikami badań naukowych oraz prac rozwojowych, w szczególności w zakresie komercjalizacji otrzymanych wyników. Realizacja programu przyczyniła się do promocji proponowanego rozwiązania na targach INNOTARG 2022 i wsparcia procesu objęcia rozwiązania ochroną patentową.

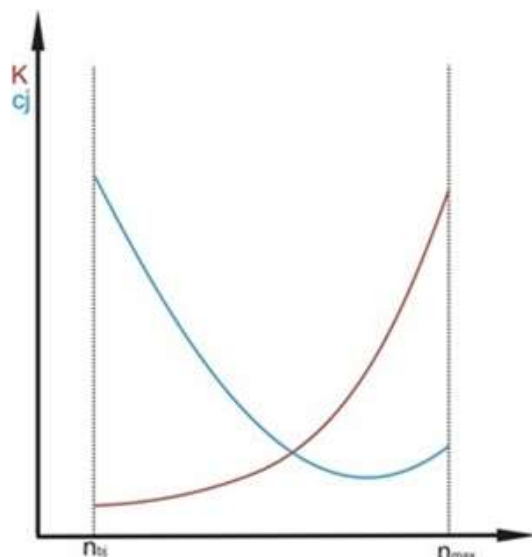
„*Inkubator Innowacyjności 4.0*” został ustanowiony komunikatem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (z dnia 5 czerwca 2020r.), finansowanym ze środków europejskich w ramach projektu pozakonkursowego „*Wsparcie zarządzania badaniami naukowymi i komercjalizacja wyników prac B+R w jednostkach naukowych i przedsiębiorstwach*”, realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020.

Na bandażu wewnętrznym kierownicy sprężarki (pierwszego, drugiego lub kilku stopni sprężarki osiowej) lub na kołnierzu wewnętrznym obudowy kierownicy wejściowej do sprężarki (ang. Inlet Guide Vane – IGV) były zamocowane cewki indukcyjne. Na obracającym się wale (bęben sprężarki lub wał zespołu wirnikowego) były umieszczone magnesy. W początkowym etapie rozruchowym silnika układ ten pracował jako rozrusznik. Podczas uruchamiania silnika do minimalnej prędkości obrotowej zespół elektryczny pomagał w osiągnięciu optymalnych parametrów obrotowych wirnika wymaganych do rozruchu silnika. Takie wykorzystanie energii elektrycznej do napędu zespołu wirnikowego pozwalało na zminimalizowanie ilości systemów pobocznych silnika.

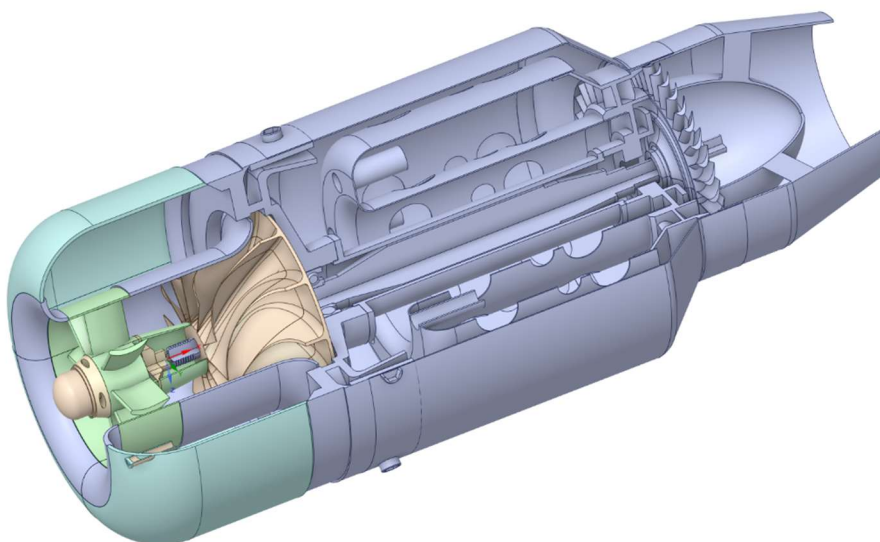
W trakcie pracy ustalonej zespół turboalternatora produkował prąd na potrzeby płatowcowe i silnikowe. Pod stwierdzeniem pracy ustalonej przyjmowano zakres pracy silnika gwarantujący bezpieczny lot poziomy, a tym samym najniższe jednostkowe zużycie paliwa, co zostało zaprezentowane na charakterystyce obrotowej silnika (rys. 16). Nadwyżki były gromadzone w akumulatorach jako energia elektryczna, którą można wykorzystać w późniejszym rozruchu, do napędu dodatkowego silnika elektrycznego lub do wyeliminowania turbiny niskiego ciśnienia napędzającej wentylator kanału zewnętrznego (rolę tej turbiny przejmowałaby silnik elektryczny). Ponadto wytwarzana energia elektryczna (w czasie rzeczywistym) byłaby wykorzystywana do napędu silników elektrycznych systemu rozproszonego.

Wykorzystanie proponowanego rozwiązania pozwala na zwiększenie efektywności procesu wytwarzania energii elektrycznej, która mogłaby być skonsumowana do zasilania pomocniczych elektrycznych zespołów napędowych. Koncepcja taka miała na celu zmniejszenie zużycia paliwa przez samolot w trakcie lotu, co wiązało się również ze zmniejszoną emisją związków szkodliwych (zawartych w spalinach) do atmosfery oraz poprawą wskaźników ekonomicznych.

Przedstawiony projekt proponował wykorzystanie stopnia sprężarki i bębna sprężarki jako silnika indukcyjnego. Była to propozycja stworzenia silnika hybrydowego – turbinowo-elektrycznego, prezentowanego na rysunku 17.



Rys. 16. Przykładowe charakterystyki obrotowe silnika turbinowego (linia niebieska – jednostkowe zużycie paliwa c_j od prędkości obrotowej n ; linia czerwona – ciąg silnika K od prędkości obrotowej n).



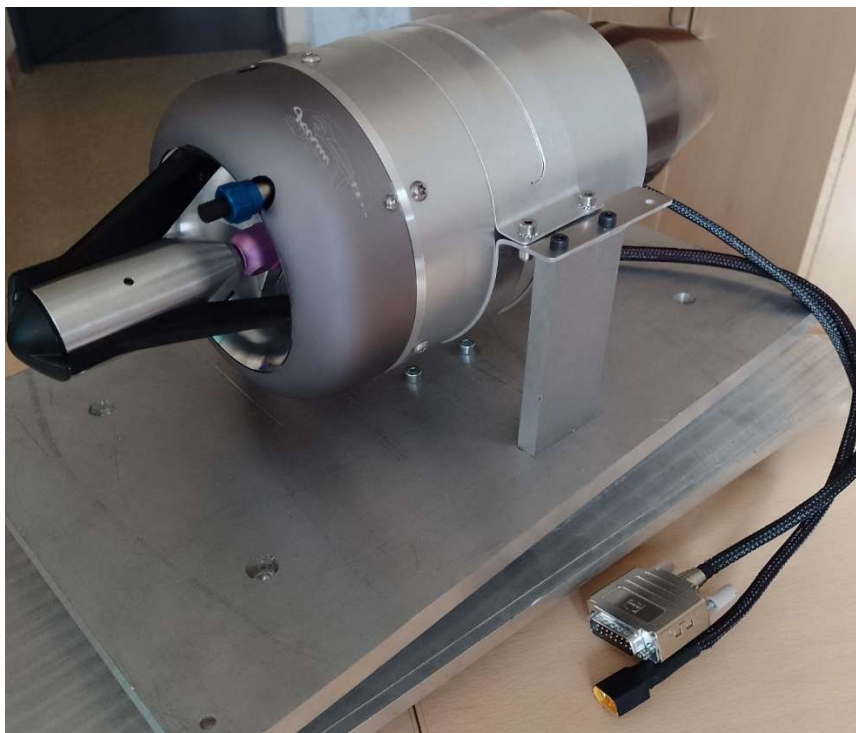
Rys. 17. Model geometryczny przygotowywanego demonstratora.

Wykonanie tego turboalternatora wymagałoby wprowadzenia kilku modyfikacji konstrukcji sprężarki osiowej. Należałoby wzmocnić łopatki kierownic oraz sam bandaż. W łopatkach konieczne byłoby wykonanie otworów do przeprowadzenia okablowania do cewek (uzwojenia stojana). Alternatywnym rozwiązaniem byłoby zwiększenie grubości

kilku łopatek kierownic w celu przeprowadzenia kanału dla okablowania cewek indukcyjnych.

Na bębnie sprężarki lub wale umieszczano rdzeń ferromagnetyczny stanowiący obwód dla strumienia magnetycznego występującego w maszynie. Dodatkowo na wirniku (w naszym przypadku wał lub bęben sprężarki) i stojanie (bandaż sprężarki osiowej lub kołnierz IGV) umieszczano uzwojenie, w którym byłaby indukowana SEM i płynąłby prąd.

Efektom prac B+R był prototyp turboalternatora ukazujący możliwości wykorzystania go do rozruchu silnika lotniczego i późniejszego jego spowalniania. W ramach prac, zweryfikowano założenia projektowe poprzez zintegrowanie silnika elektrycznego z wirnikiem sprężarki odśrodkowej. Przeprowadzono serie badań do oceny możliwości rozruchu lub hamowania wirnika w stanach przejściowych. Przygotowany demonstrator zaprezentowałem na rysunku 18.



Rys. 18. Demonstrator turboalternatora zintegrowanego z wirnikiem sprężarki.

Omawiane rozwiązanie zostało zgłoszone do uczelnianego Biura Rzecznika Patentowego i uzyskało zgodę rektora Politechniki Rzeszowskiej na zgłoszenie do Urzędu Patentowego RP oraz innych europejskich urzędów patentowych.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Interdyscyplinarny charakter realizowanych prac badawczych, w dotychczasowym przebiegu kariery naukowej, pozwolił nawiązać współpracę z pracownikami innych uczelni i instytucji zagranicznych, zarówno krajowych jak i zagranicznych.

- 5.1. Współpraca z innymi uczelniami lub instytucjami naukowymi o zasięgu międzynarodowym.

5.1.1. Lehigh University

W ramach stypendium Fulbright Junior Research Award spędziłem ponad 6 miesięcy (od sierpnia 2018 do marca 2019) na Lehigh University w Bethlehem (Pennsylvania, USA). Początkowo realizowałem badania z zakresu modelowania obciążeń aerodynamicznych i trwałości zmęczeniowej, z czasem jednak rozszerzyłem plan badań o badania materiałowe skupiające się na wartościach naprężeń szczątkowych i uplastycznieniu wywołanym kulowaniem. Efektem wspomnianych prac były wspólne publikacje z prof. Wojciechem Misiołkiem. [A4] i [A5].

Po zakończeniu stażu kontynuowałem współpracę z prof. Jaworskim nad wpływem modelowania obciążeń aerodynamicznych na stan naprężeń sprężarki odśrodkowej [A7]. Powstała publikacja była jednocześnie powiązana z realizowanym projektem WUCH Dębica.

5.1.2. Sudwestfalen Fachhochschule

W kwietniu 2022 odbyłem tygodniowy staż w ramach programu Erasmus+ na Sudwestfalen Fachhochschule w Soest (Niemcy). Pomimo dydaktycznego charakteru stażu, udało się nawiązać współpracę naukową. Współpraca ta powiązana była z przeprowadzeniem materiałowych badań zmęczeniowych (opisanych w monografii habilitacyjnej) oraz opracowaniu wspólnej płaszczyzny zainteresowań badawczych z obszaru druku 3D i możliwości wykorzystywania tej technologii w silnikach lotniczych. Efektem przeprowadzonych badań jest publikacja przygotowana we współpracy z prof. Alfonsem Noe, która została zaprezentowana na konferencji SolMech 2024 [K23] we Wrocławiu.

Rozwój technik wytwórczych oraz metod przyrostowych umożliwił nowe, bardziej efektywne wykorzystanie możliwości wielu maszyn i mechanizmów. Jedną z najbardziej restrykcyjnych i wymagających gałęzi technologii okazał się przemysł lotniczy, w szczególności elementy maszyn wirujących – sprężarki i łopatki turbin. Proces optymalizacji maszyn wirujących, uwzględniający nowe techniki wytwarzania, takie jak druk 3D, pozwolił na dowolne kształtowanie tych maszyn oraz ich odciążenie. Wymagania dotyczące wytrzymałości i rodzaju materiału zostały spełnione dzięki zastosowaniu metody DMLS (Direct Metal Laser Sintering).

W niniejszej publikacji przedstawiono metodologię budowy modelu numerycznego materiału ortotropowego, uwzględniającego wzór wypełnienia oraz orientację warstw, a także wpływ tego modelowania na wytrzymałość i poziomy naprężeń łopatki sprężarki. Przedmiotem badań była łopatka sprężarki silnika lotniczego, pierwotnie wykonana ze

stopu EI-961. W celach porównawczych przeprowadzono analizy z wykorzystaniem stopu Ti6Al4V. Dobór materiału do obliczeń był podyktowany dostępnością materiałów możliwych do zastosowania w druku SLM. W analizach przyjęto kryteria maksymalnych naprężeń głównych oraz odpowiadających im maksymalnych prędkości obrotowych wirnika sprężarki osiowej.

Dodatkowym celem pracy było określenie wpływu orientacji warstw na sztywność oraz częstotliwości rezonansowe. Autorzy starali się również uwzględnić klasyczne kryteria zniszczenia (maksymalne naprężenie, Tsai-Hill, Tsai-Wu), znane z analiz struktur kompozytowych, w celu określenia dopuszczalnego obciążenia. Praca zakończyła się uzyskaniem wyników ilościowych i konstytutywnych dotyczących wpływu modelu materiałowego oraz kierunku wzrostu na wytrzymałość i maksymalne dopuszczalne prędkości obrotowe analizowanej sprężarki.

5.2.3. University of Sao Paulo

Współpraca z University of Sao Paulo, a dokładniej z prof. Marcelo Alves rozpoczęła się w lutym 2023. Zainteresowany jego publikacją, nawiązaliśmy kontakt. Zaowocowało to opracowaniem wspólnego planu badań oraz zaproszeniem na odbycie stażu dydaktycznego w ramach programu Erasmus+ pozaeuropejskiego. W trakcie stażu ustaliliśmy wspólny zakres prac, który dotyczył ortotropowości materiałowej i modelowania zachowania materiału wykazującego anizotropowość, aby wykorzystać to w kontekście druku 3D. Współpraca z prof. Alvesem została zaprezentowana na konferencji SolMech 2024 we Wrocławiu [K23]. Szczegóły publikacji opisano przy rozdziale dotyczącym współpracy z Sudwestfalen Fachhochschule.

5.2.4. Sankt Petersburg State University

W trakcie Letniej Szkoły Mechaniki Pękania 2015 w Bezmiechowej nawiązałem współpracę z kilkoma naukowcami z Sankt Petersburg State University. Efektem tej współpracy było opublikowanie 7 publikacji (w okresie od 2015 do 2017) z obszaru wytrzymałości sprężarek osiowych, modelowania obciążeń i odporności powłok ceramicznych na erozję i zmęczenie. Większość wspomnianych publikacji powiązane było z realizowaną przeze mnie w tamtym okresie pracą doktorską.

5.2. Współpraca z innymi uczelniami lub instytucjami naukowymi o zasięgu krajowym.

5.2.1. Politechnika Łódzka

Od kilku lat współpracuję z dr. inż. Kirillem Kabalykiem z Politechniki Łódzkiej w obszarze badania sprężarek promieniowych stosowanych w napędach lotniczych i przemysłowych. Nasze działania obejmowały zarówno numeryczne analizy CFD, jak i badania eksperymentalne parametrów pracy wirników, a także wstępną ocenę zachowania maszyn w stanach granicznych, takich jak pojawienie się surge. Sama współpraca rozpoczęła się od mojego zaangażowania w przygotowywanie projektu Lider przez dr. Inż. Kabalyka.

Jako efekt współpracy można wyróżnić dwie wspólne publikacje naukowe, z czego jedna [A9] jest częścią ciągu publikacyjnego, opisywanego w rozdziale 4.

Druga publikacja "*Fatigue safety factor of a transonic centrifugal compressor impeller subject to blade thickness*", autorstwa: Kirill Kabalyk, Arkadiusz Bednarz i Krzysztof Kantyka (Scientific Reports volume 15, Article number: 18693 (2025), Punkty MNiSW/MEiN: 140) dotyczy modelowania i osiągnięć sprężarek odśrodkowych w kontekście przepływów transsonicznych. Wspomniane badanie wrażliwości koncentrowało się na określeniu stopnia, w jakim grubość łopatki wpływała na ryzyko wystąpienia zmęczenia wysokocyklowego w wirniku sprężarki odśrodkowej. Analizowany wirnik ze stopu tytanu służył do sprężania i dostarczania powietrza do komory spalania silnika odrzutowego znanego komercyjnie jako DGEN 380. Ryzyko rezonansu łopatek podczas startu występowało pomiędzy stycznym modami własnymi z czterema średnicami węzłowymi a czwartym źródłem wzbudzenia wynikającym z porządku pracy silnika. W badaniu zastosowano słabe sprzężenie numerycznych solverów przepływowych i strukturalnych w celu zasymulowania drgań rezonansowych dla trzech wariantów konstrukcyjnych wirnika: o mniejszej, bazowej i większej grubości łopatek.

Przejsiowe obciążenie aerodynamiczne zostało najpierw oszacowane z wykorzystaniem metody harmonicznej transformacji Fouriera. Następnie obciążenie to zaaplikowano do strukturalnego modelu odpowiedzi harmonicznej, a naprężenia drganiowe obliczono dla serii krytycznych współczynników tłumienia. Kolejna ocena współczynników bezpieczeństwa została przeprowadzona na podstawie diagramu Haigha, opracowanego z wykorzystaniem równania Goodmana. Przyjęto wymaganie minimalnej liczby cykli do zniszczenia, aby zapewnić, że łopatki będą w stanie wytrzymać rezonans przez odpowiednio długi czas.

Uzyskane wyniki nie wykazały potencjalnych problemów związanych ze zmęczeniem wysokocyklowym dla konstrukcji bazowej i grubszej. Bezpieczna eksploatacja wariantu cieńszego była silnie uzależniona od poziomu tłumienia w układzie, a jego trwała eksploatacja nie mogła zostać zagwarantowana. Wyniki badania mogą okazać się przydatne dla inżynierów mechaników zajmujących się sprzężonymi zagadnieniami przepływowo-strukturalnymi w sektorze lotniczym, energetycznym oraz środowiskowym.

5.2.2. Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Instytut Lotnictwa

Efektom współpracy z Wojskową Akademią Techniczną im. Gen. Jarosława Dąbrowskiego, Instytutem Technicznym Wojsk Lotniczych oraz Instytutem Lotnictwa w Warszawie, były trzy publikacje naukowe. Pierwsza, opisywana w rozdziale 4.3 jako publikacja [A8] skupiała się na tematach powiązanych ze składowym osiągnięciem naukowym. Celem pracy było numeryczne określenie wpływu obciążeń aerodynamicznych na wartość częstotliwości rezonansowej łopatki sprężarki. Przedmiotem badań była łopatka pierwszego stopnia sprężarki silnika PZL-10W. W ramach badań wykonano obliczenia analityczne częstotliwości rezonansowej i porównano je z danymi literaturowymi (pierwsza, druga i trzecia postać drgań wymuszonych). W kolejnym etapie opracowano model obliczeniowy stopnia sprężarki (obszar przepływowy i wirniki) oraz przeprowadzono analizę FSI. Analiza ta opierała się na modelowaniu CFD stanu obciążeń aerodynamicznych działających na powierzchnie

łopatki, a następnie wartości te zaimportowano jako obciążenia zewnętrzne do analizy strukturalnej, która stanowiła podstawę analizy modalnej, w ramach której wyznaczono częstotliwości rezonansowe dla trzech pierwszych postaci drgań. W ramach analiz zweryfikowano zarówno wpływ obciążeń aerodynamicznych, jak i prędkości obrotowej wirnika sprężarki. Dzięki temu możliwa była ocena wpływu zarówno prędkości obrotowej (i wynikającej z niej siły odśrodkowej), jak i pojawiających się obciążeń aerodynamicznych. Uzyskane wyniki umożliwiły ocenę wpływu wspomnianych warunków eksploatacyjnych silnika lotniczego na częstotliwość rezonansową, co z kolei może przełożyć się na trwałość krytycznych elementów silnika lotniczego.

Drugą wspólną publikacją była „*Technological Aspects of a Reparation of the Leading Edge of Helicopter Main Rotor Blades in Field Conditions*”, autorstwa zespołu: Michał Sałaciński, Krzysztof Puchała, Andrzej Leski, Elżbieta Szymczyk, Volodymyr Hutsaylyuk, Arkadiusz Bednarz, Piotr Synaszko, Rafał Kozera, Klaudia Olkowicz i Dominik Głowacki (Appl. Sci. 2022, 12(9), 4249; <https://doi.org/10.3390/app12094249> , Punkty wg listy MNiSW/MEiN: 100).

Publikacja skupiała się na możliwości napraw, i potrzebnej technologii, łopat wirników ze śmigłowców. Siły Powietrzne RP eksploatowały ponad sto śmigłowców rodziny Mi (produkowanych przez Mil Helicopters), wyposażonych w metalowe łopaty wirnika głównego. Łopaty wirnika głównego należały do najbardziej obciążonych elementów tych konstrukcji. Z tego powodu podlegały one częstszym kontrolom eksploatacyjnym niż pozostałe komponenty. Jednym z typów uszkodzeń wykrywanych podczas inspekcji było miejscowe odspajanie fragmentów warstwy przeciwoerozyjnej z krawędzi natarcia. To niepozorne uszkodzenie okazywało się bardzo niebezpieczne, ponieważ szybko prowadziło do całkowitego oderwania warstwy. Krawędź natarcia, pozbawiona metalowej osłony, ulegała szybkiemu zużyciu. Oderwana warstwa, wyrzucona z dużą prędkością, stwarzała zagrożenie dla innych części śmigłowca, takich jak wirnik ogonowy, a także mogła spowodować uszkodzenia innych maszyn lecących w szyku. Technologia dostarczana dotychczas przez producenta nie obejmowała napraw polowych tego typu uszkodzeń. Dlatego podjęto działania mające na celu opracowanie technologii szybkiej naprawy łopat w warunkach polowych podczas misji Zgrupowania Bojowego Biały Orzeł w Afganistanie. W artykule przedstawiono koncepcję technologii naprawy możliwej do zastosowania w warunkach polowych oraz wyniki badań krawędzi po naprawie. Zaprezentowano również wyniki badań materiałowych mających na celu identyfikację materiałów użytych do budowy krawędzi spływu. Wyniki tych badań umożliwiły opracowanie procesów technologicznych, a w przyszłości ułatwią dobór zastępczego systemu pasty klejącej o zbliżonych parametrach, niezbędnych do przeprowadzenia skutecznych napraw.

Trzecia publikacja przygotowana w ramach wspólnych aktywności i współpracy to: „*Aerial medical platform for soldiers and civils evacuation – Concept, implementation plan and assessment of adaptation possibility of existing technologies*”, autorstwa: Krzysztof Puchała, Grzegorz Moneta, Daniel Lichoń, Rafał Grzejda, Arkadiusz Bednarz, Witold Mielniczek, Marian Łopatka, Elżbieta Szymczyk, Sergii Ignatovych i Roman Mykhailyshyn (Adv. Sci. Technol. Res. J. 2025; 19(2):28-50, doi: <https://doi.org/10.12913/22998624/195344> , Punkty wg listy MNiSW/MEiN: 100).

We wspomnianej pracy zaproponowano koncepcję drona ewakuacyjnego, który mógłby podejmować rannych z pola walki i transportować ich do miejsca docelowego, gdzie możliwe byłoby udzielenie odpowiedniej pomocy medycznej. Opisano aktualny stan wiedzy na temat dronów i ich wyposażenia, a także możliwości wykorzystania dostępnych technologii do budowy nowego typu drona. W pracy przedstawiono wizję „przyszłego/idealnego drona” oraz „technicznie/realnie osiągalnego drona obecnie”, a w konsekwencji poziomy jego rozwoju. Omówiono główne przesłanki wyboru konfiguracji drona, w tym podstawowe wymiary charakterystyczne. Ze względu na przeznaczenie drona, czyli konieczność wykonywania podstawowych czynności medycznych, przeanalizowano obecnie stosowane roboty wykorzystywane w chirurgii zdalnej. Z uwagi na fakt, że docelowa wersja drona miała podejmować rannych bez udziału osób trzecich, przedstawiono aspekty projektowe związane z tym wymaganiem oraz zaproponowano przykłady możliwych rozwiązań.

5.2.3. Politechnika Świętokrzyska

Współpraca z Politechniką Świętokrzyską rozpoczęła się od udzielonego wsparcia w trakcie przygotowywania wniosku i planowanych wspólnych działań, związanych z realizacją projektu, otrzymanego przez dr inż. Annę Adamczak-Bugno, LIDER XV pt.: *„Technologia identyfikacji i lokalizacji defektów infrastruktury pracującej w kontakcie z wodorem wykorzystująca zjawisko emisji akustycznej”*. Moje zaangażowanie dotyczyło oceny wykorzystania omawianej technologii w silnikach lotniczych. Będę również wykonawcą działań związanych z modelowaniem procesu niszczenia w środowisku Ansys Workbench.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

6.1. Działalność dydaktyczna

Pracując na Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, w latach 2014-2025, prowadziłem zajęcia dydaktyczne z następujących przedmiotów (forma zajęć w nawiasie):

- Wytrzymałość Materiałów (ćwiczenia);
- Wytrzymałość Materiałów (wykład);
- Wytrzymałość Materiałów 1 (ćwiczenia);
- Wytrzymałość Materiałów 1 (wykład);
- Wytrzymałość Materiałów 2 (ćwiczenia);
- Wytrzymałość Materiałów 2 (laboratorium);
- Wytrzymałość Materiałów i konstrukcji 2 (laboratorium);
- Prawo i przepisy lotnicze w projektowaniu silników lotniczych (ćwiczenia);
- Prawo i przepisy lotnicze w projektowaniu silników lotniczych (laboratorium);
- Prawo i przepisy lotnicze w projektowaniu silników lotniczych (wykład);
- Teoria silników lotniczych (ćwiczenia);
- Teoria silników lotniczych (wykład);
- Spalanie i komory spalania (ćwiczenia);
- Silniki lotnicze i kosmiczne (laboratorium);
- Budowa silników lotniczych (ćwiczenia);
- Budowa silników lotniczych (wykład);
- Metody numeryczne w projektowaniu silników lotniczych (laboratorium);
- Badania silników lotniczych (laboratorium);
- Badania niszczące złączy spawanych (laboratorium);
- Badania niszczące złączy spawanych (wykład);
- Projekt inżynierski (projekt);
- Modelowanie przestrzenne (projekt);
- Wytrzymałość materiałów i podstawy MES (laboratorium);
- Wytrzymałość materiałów i podstawy MES (wykład);
- Zmęczenie Materiału (laboratorium);
- Zmęczenie Materiału (wykład).

Ponadto prowadziłem zajęcia dla studentów zagranicznych w ramach programu Erasmus. Były to zajęcia z przedmiotu:

- Aircraft Engines Design.

W ramach programu Erasmus+ prowadziłem wykłady w języku angielskim, dotyczące:

- Projektowania silników lotniczych (Brazylia, 2024);
- Teoria i konstrukcja silników lotniczych (Niemcy, 2022; Brazylia, 2024);
- Trwałości zmęczeniowej silników (Niemcy, 2022; Brazylia, 2024);
- Wytrzymałość materiałów w zastosowaniach lotniczych (Niemcy, 2022; Brazylia, 2024).

W ramach programu Erasmus+ odbyłem staże dydaktyczne w:

- Sudwestfalen Fachhochschule, Soest, Niemcy, 2022;
- Polytechnic School of the University of Sao Paulo, Brazylia, 2024.

Jako promotor sprawowałem opiekę naukową nad 37 pracami kwalifikacyjnymi, w tym pełniłem funkcję promotora w 12 pracach inżynierskich oraz 25 pracach magisterskich (jedna praca w języku angielskim, jedna była podstawą artykułu naukowego [A9] i jedna praca we współpracy z przemysłem). Byłem również recenzentem 11 prac dyplomowych i członkiem 71 komisji dyplomowych.

W roku akademickim 2023/2024 przygotowałem plan studiów podyplomowych (Analizy Wytrzymałościowe dla Przemysłu Lotniczego), które uruchomiono w roku akademickim 2024/2025 (edycja 1). Obecnie trwa edycja 2. W obu edycjach pełniłem funkcję kierownika studiów podyplomowych. Wspomniane studia podyplomowe są odpowiedzią na zapotrzebowanie w otaczającym przemysłem lotniczym. Do prowadzenia zajęć zostali zaproszeni pracownicy takich firm jak Pratt&Whitney Rzeszów, Safran Aircraft Engines Poland i Boeing Poland.

6.2. Działalność organizacyjna i popularyzująca naukę.

Poza wspomnianymi powyżej studiami podyplomowymi (przygotowanie i kierowanie studiami), byłem członkiem komisji zajmującym się utworzeniem nowego planu studiów kierunku Lotnictwo i Kosmonautyka, przygotowywanego w okresie 2020-2021), realizowanego w ramach kształcenia na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Jestem autorem lub współautorem 38 artykułów naukowych, z czego 23 indeksowane w WoS. Dla wspomnianych artykułów uzyskałem indeks Hirscha (H-Index) równy 6 (według WoS i według Scopus).

W listopadzie 2018 (16.11.2018r.) uczestniczyłem w konferencji INTERNATIONAL EDUCATION DAY at the UN, jako przedstawiciel Lehigh University (Bethlehem, PA, USA) do Organizacji Narodów Zjednoczonych. Konferencja miała miejsce w głównej siedzibie ONZ w Nowym Jorku (USA).

W latach 2021-2025 pełniłem funkcję Ambasadora Programu Fulbrighta, związanego z Polsko-Amerykańską Komisją Fulbrighta finansującą staże badawcze w Stanach Zjednoczonych. W ramach tej aktywności uczestniczyłem w licznych konferencjach i sympozjach (w Warszawie, Lublinie i Rzeszowie). W ramach tej aktywności w maju 2023 zorganizowałem wydarzenie Fulbright Day na Politechnice Rzeszowskiej. Event gościł 7 naukowców ze Stanów Zjednoczonych (odbywających staże w polskich instytucjach naukowych) i trzech przedstawicieli jednostek polskich. Wydarzeniem zainteresowały się również lokalne media, co przełożyło się na wywiad w Radio Centrum. Dodatkowo, w ramach aktywności ambasadorskich uczestniczyłem w dwóch wydarzeniach promocyjnych realizowanych na: KUL (w lutym 2022) i UMCS (w październiku 2023).

W ramach współpracy z Polsko-Amerykańską Komisją Fulbrighta, zaangażowałem się w 8 recenzji wniosków stypendialnych polskich naukowców do Stanów Zjednoczonych

oraz w opiekę nad dwojgiem stypendystów wizytujących uczelnie z województwa podkarpackiego.

W okresie od 2019 do 2025 roku, przeprowadziłem ponad 50 recenzji artykułów naukowych:

- 11 w czasopiśmie *Energies* (140 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 8 w czasopiśmie *Aerospace* (70 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 6 w czasopiśmie *Applied Sciences* (100 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 6 w czasopiśmie *Materials* (140 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 3 w czasopiśmie *Drones* (20 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 3 w czasopiśmie *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* (100 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 2 w czasopiśmie *Designs* (20 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 2 w czasopiśmie *Inventions* (20 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 2 w czasopiśmie *Polymers* (100 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 1 w czasopiśmie *Transactions on Aerospace Research* (20 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 1 w czasopiśmie *Entropy* (100 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 1 w czasopiśmie *Fluids* (40 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 1 w czasopiśmie *Machines* (20 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 1 w czasopiśmie *Mathematics* (20 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 1 w czasopiśmie *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* (70 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 1 w czasopiśmie *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* (70 pkt wg listy MNiSW/MEiN);
- 1 w czasopiśmie *World Electric Vehicle Journal* (20 pkt wg listy MNiSW/MEiN).

We wrześniu 2022 pełniłem wolontariat na konferencji Mechaniki Płynów (XXV Fluid Mechanics Conference, Rzeszów), organizowanej przez prof. Annę Kucabę-Piętał.

Od 2015 jestem członkiem Polskiej Grupy Mechaniki Pękania oraz European Structural Integrity Society, zrzeszające naukowców z dziedziny inżynierii mechanicznej, zajmujących się badaniami zmęczeniowymi i mechaniką pękania. Dodatkowo, od 2019 jestem członkiem European Aeronautics Science Network, oraz od 2020 w DGM Akademii (Niemieckie Towarzystwo Materiałoznawcze).

W dniach 11-12 maja 2022 uczestniczyłem w targach innowacyjności *INTARG 2022* w Katowicach (Polska). *INTARG 2022*, a dokładniej *Międzynarodowe Tarki Wynalazków i Innowacyjności* to wydarzenie o zasięgu międzynarodowym. Wraz z zespołem prezentowaliśmy projekt turboalternatora lotniczego, który otrzymał złoty medal targów oraz jako jedyny uzyskał wyróżnienie nadawane przez *World Inventions Intellectual Property Association* z siedzibą w Tajwanie. Prezentowany projekt był efektem prac realizowanych w ramach projektu *Inkubator Innowacyjności 4.0*.

Uczestniczyłem w kilku edycjach Konferencji Rady Partnerów Centrum Zaawansowanych Technologii AERONET "Dolina Lotnicza" Forum Współpracy NAUKA GOSPODARKA, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów (w tym wystąpienie w czerwcu 2023 jako przedstawiciel Boeing Poland).

Byłem członkiem Rady Naukowej na studenckiej konferencji International Seminar „Current Issues” in Economics, Management and Engineering (2021 i 2023)

W okresie 2014 do 2025 uczestniczyłem w następujących konferencjach:

- [K1] TransComp 2014, 01.12-04.12.2014r., Zakopane (Polska);
- [K2] VIII-th International Symposium of Mechanics of Materials and Structures, 31.05. - 03.06.2015r. Augustów (Polska);
- [K3] I Summer School of Micromechanics, 03.06.-13.06.2015r., Bezmiechowa (Polska);
- [K4] XLIII Summer School – Conference „Advanced Problems in Mechanics”, 22.06.-27.06.2015r., Sankt Petersburg (Rosja);
- [K5] 3-rd Polish Congress of Mechanics, 21-st International Conference on Computer Methods in Mechanics, 08.09.2015r. – 11.09.2015r., Gdańsk (Polska);
- [K6] XV Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, 15.09.2015r. – 18.09.2015r., Kielce (Polska);
- [K7] Symulacja 2016 Konferencja użytkowników Ansys, 13.04.2016r. - 15.04.2016r., Serock (Polska);
- [K8] PROGRESSIVE TECHNOLOGIES AND MATERIALS IN MECHANICAL ENGINEERING Protechma 2016, 22.06.2016r. - 24.06.2016r., Bezmiechowa (Polska);
- [K9] Konferencja Awioników, 22.06.2016r. - 24.06.2016r., Rzeszów (Polska);
- [K10] 42nd International Scientific Congress on Powertrain and Transport Means European KONES 2016, 11.09.2016r.–14.09.2016r., Jastrzębia Góra (Polska);
- [K11] TransComp 2016, 05.12.2016r. - 08.12.2016r., Zakopane (Polska);
- [K12] Konferencja 3D 2017, 29.03.2017r. - 31.03.2017r., Toruń (Polska);
- [K13] FUE 2017 – Fizyka Uszkodzeń Eksploatacyjnych 2017, 28.05.2017r. - 31.05.2017r., Krynica Zdrój (Polska);
- [K14] 43nd International Scientific Congress on Powertrain and Transport Means European KONES 2017, 04.09.2017r.–07.09.2017r., Kraków (Polska);
- [K15] XVI Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, 12.09.2017r. – 14.09.2017r., Pułtusk (Polska) ;
- [K16] TransComp 2017, 04.12.2017r. - 07.12.2017r., Zakopane (Polska) ;
- [K17] 45th International Scientific Congress on Powertrain and Transport Means European KONES 2019, 9.09.2019r.–11.09.2019r., Jastrzębia Góra (Polska);
- [K18] XVII Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, 16.09.2019r. – 19.09.2019r., Hucisko (Polska);
- [K19] 4th FDMD 2020 Fatigue Design and Materials Defects, "The International Symposium on Fatigue Design and Material Defects", 26.05.2020r. - 28.05.2020r., online Potsdam (Niemcy);
- [K20] AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum, 24.08.2020r. - 28.08.2020r., online New Orlean (USA);
- [K21] Transcomp 2021, 06.12.2021r. - 08.12.2021r., Zakopane (Polska);
- [K22] Transcomp 2022, 05.12.2022r. - 07.12.2022r., Zakopane (Polska);
- [K23] SolMech 2024 43rd Solid Mechanics Conference, 16.09.2024r. - 18.09.2024r., Wrocław (Polska).

Ponadto pełnię funkcję promotora pomocniczego w ramach doktoratu Pani mgr inż. Moniki Lubas, pod roboczym tytułem: „*Numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz nośności połączeń nitowych*”, w którym promotorem jest dr hab. inż. Tomasz Kopecki, prof. PRz.

Efektom współpracy z mgr inż. Moniką Lubas była m.in. publikacja "*Material model effect for simulating a single-lap joint with a blind rivet*", autorstwa: Monika Lubas, Arkadiusz Bednarz (Materials 2021, 14(23), 7236; <https://doi.org/10.3390/ma14237236> , Punkty MNiSW/MEiN: 140).

Praca dotyczyła wpływu metody modelowania materiału na wyniki analiz wytrzymałościowych. Obiektem badań było połączenie zakładkowe z nitem zrywalnym (ISO 12996). Wyniki numerycznej analizy wytrzymałościowej dla różnych konfiguracji modeli materiałowych z nieliniowością materiałową i kontaktową porównano nie tylko z wynikami eksperymentalnymi takiego połączenia, lecz także z wartościami oszacowanymi za pomocą klasycznych narzędzi analitycznych (naprężenie kontaktowe według Hertza i naprężenie kontaktowe powierzchniowe). Celem badań było określenie, w jaki sposób metoda modelowania materiału wpływała na wyniki analiz numerycznych (MES) oraz jak te wyniki odnosiły się do obserwacji eksperymentalnych. W ramach analiz zbudowano dyskretny model nitowany oraz odpowiednie modele materiałowe. Analizy uwzględniały różne przypadki obciążenia (od 10 do 90% nośności połączenia), aby lepiej zilustrować zależność pomiędzy wynikami numerycznymi a eksperymentalnymi. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że model liniowo-sprężysty był akceptowalnym i zalecanym rozwiązaniem (przy obciążeniu do 90% nośności połączenia) dla dalszych badań.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

7.1. Nagrody i wyróżnienia.

Wśród nagród i wyróżnień, jakie zdobyłem w trakcie pracy na Politechnice Rzeszowskiej, można wyróżnić następujące:

- Nagroda od World Invention Intellectual Property Association WIIPA (12 maja 2022r.) za innowacyjne rozwiązanie naukowe prezentowane na targach INTARG 2022;
- ZŁOTY MEDAL od Jury Międzynarodowych Targów Innowacji Gospodarczych i Naukowych INTARG, za projekt pt. „Innovative aeronautical turbo-alternator” (12 maja 2022 roku);
- Nagroda JUNIOR RESEARCH AWARD 2019 od Polsko-Amerykańskiej Komisji Fulbrighta, finansująca staż naukowy w Stanach Zjednoczonych;
- Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w 2020 (za 2019) za uzyskanie tytułu naukowego doktora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna;
- Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w 2021 (za 2020) za publikację naukową;
- Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w 2022 (za 2021) za 2 publikacje naukowe;
- Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w 2023 (za 2022) za publikację naukową;
- Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w 2024 (za 2023) za publikację naukową;
- Nominacja do tytułu Osobowość Roku 2019 w kategorii Nauka – plebiscytu organizowanego przez Nowiny.

Poza wymienionymi powyżej nagrodami i wyróżnieniami, udzieliłem:

- wywiad dla Radia Centrum (w 2023);
- wywiad dla Radia Rzeszów (w 2018 i w 2025);
- wywiad dla TVP Rzeszów (w 2018).

7.2. Projekty

Z perspektywy zawodowej, ważne były również projekty, w których brałem udział i rolę jaką w nich pełniłem. W trakcie pracy na Politechnice Rzeszowskiej byłem kierownikiem 3 projektów badawczych i przemysłowych oraz wykonawcą w 4 kolejnych.

W latach okresie styczeń 2021 – czerwiec 2022 realizowałem autorski projekt pt. „Turboalternator lotniczy zintegrowany z bębniem/wałem i statorem sprężarki” (nr 10/I/2021; MNiSW/2020/346/DIR), w ramach programu „Inkubator Innowacyjności 4.0”. Celem programu było wsparcie komercjalizacji wyników badań naukowych i prac rozwojowych. Projekt uzyskał promocję na targach INNOTARG 2022 oraz wsparcie w procesie zgłoszenia patentowego. Szczegółowo projekt został opisany w rozdziale 4.4.

Program „*Inkubator Innowacyjności 4.0*”, ustanowiony przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, był finansowany ze środków UE w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020.

W ramach projektu opracowano i wdrożono turboalternator zintegrowany z zespołem sprężarki osiowej silnika lotniczego. Cewki indukcyjne umieszczono w kierownicy wlotowej (IGV), a magnesy trwałe – na bębnie sprężarki. Układ pełnił funkcję rozrusznika w fazie rozruchu, a podczas pracy ustalonej generował energię elektryczną na potencjalne potrzeby pokładowe i napędowe.

Nadwyżki energii mogą być magazynowane i wykorzystywane m.in. do ponownego rozruchu, zasilania dodatkowych silników elektrycznych lub zastąpienia turbiny niskiego ciśnienia. Rozwiązanie to pozwoliło na ograniczenie zużycia paliwa, redukcję emisji spalin oraz uproszczenie układu napędowego.

Pełne wdrożenie wymagałoby modyfikacji konstrukcji sprężarki: wzmocnienia łopatek kierownic, wykonania kanałów na okablowanie oraz integracji uzwojeń i rdzenia ferromagnetycznego. Prototyp został zbudowany i przetestowany, a technologia zgłoszona do ochrony patentowej.

W okresie sierpień 2022 do wrzesień 2024, byłem kierownikiem projektu pt. „*TITAN – vibration tests dedicated for Robotic Arm Development for On-Orbit Servicing Operations*”, w którym zleceniodawcą był PIAP SPACE Sp. Z o.o., realizowanym na zlecenie Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA). Obiektem badawczym był fragment (część 1 – rys. 19a) i całe ramię (część 2 – rys. 19b) ramienia robotycznego, projektowanego do naprawiania satelit i zbierania śmieci z przestrzeni kosmicznej (a następnie ich deorbitacja). W ramach projektu zaprojektowano specjalistyczny uchwyt/adapter (rys. 20) do wzbudnika drgań oraz przeprowadzono serie badań eksperymentalnych dla uchwytu, pojedynczego komponentu i całego ramienia robotycznego. Komponenty były testowane w zakresie regulowanym przez przepisy Europejskiej Agencji Kosmicznej. W projekcie odpowiadałem za projektowanie, modelowanie i analizy adaptera, a także jako kierownik koordynowałem wszystkie prace i zatwierdzałem raporty końcowe. Badania eksperymentalne polegały na generowaniu i symulowaniu obciążeń mechanicznych (drgania), które odpowiadałyby warunkom porównywalnym z wibracjami w trakcie wynoszenia na orbitę. W ramach funkcji kierownika koordynowałem prace 11 osób.

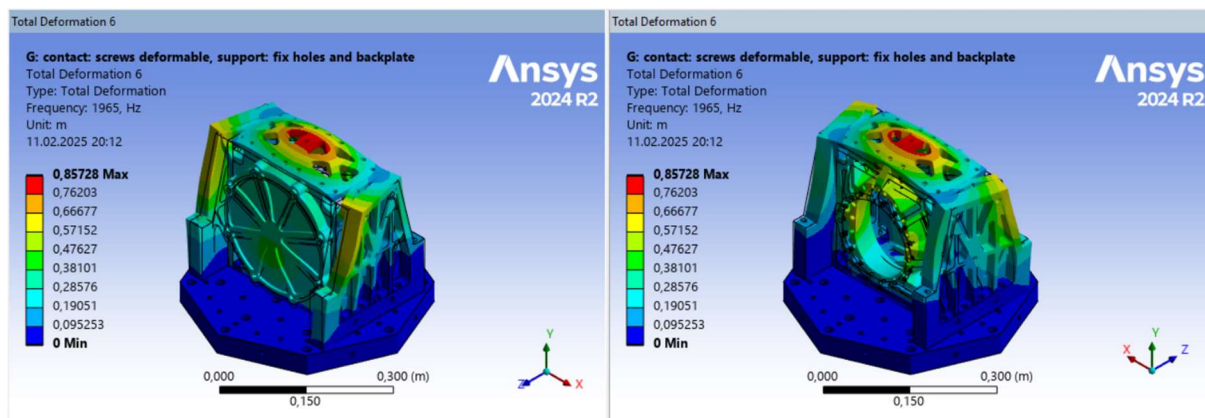


a)



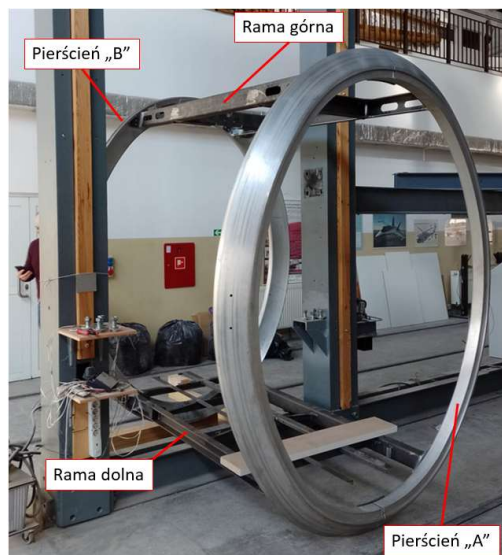
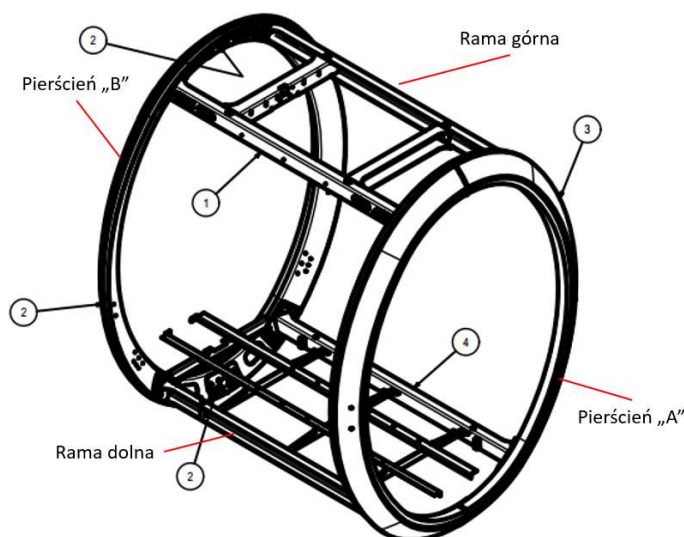
b)

Rys. 19. Komponent (a) i ramię robotyczne (b) TITAN w trakcie realizowanych testów wibracyjnych.



Rys. 20. Adapter do komponentu ramienia, projektowany na potrzeby badań rezonansowych – drgania wymuszone.

W okresie od lutego 2022 do sierpnia 2022, byłem kierownikiem projektu badawczego przemysłowego realizującego „Badania zmęczeniowe w zakresie spełnienia wymagań normy PN-EN 13796-3”, w ramach projektu „Opracowanie technologii wytwarzania innowacyjnej gondoli do kolei linowych” prowadzonego przez Transsystem Spółka Akcyjna z siedzibą Woli Dalszej koło Łańcuta. Jako kierownik i główny inżynier odpowiadałem za kontakt ze zleceniodawcą, koordynowanie prac zespołu oraz przygotowanie i zatwierdzenie raportów końcowych z przeprowadzonych badań zmęczeniowych gondoli (rys. 21). Raporty były przekazywane do instytucji certyfikującej gondolę, czyli Transportowy Dozór Techniczny. Obiektem badań był szkielet 6-cio osobowej gondoli linowej. W ramach badań, w ciągu dwóch miesięcy, przeprowadzono eksperymentalne testy zmęczeniowe, w trakcie których przyłożono obciążenie (21kN, rozciągające w kierunku pionowym) 5 mln razy. W ramach funkcji kierownika koordynowałem prace 9 osób.



Rys. 21. Rysunek i zdjęcie gondoli do kolei linowych (obiekту badawczego) z zaznaczonymi najważniejszymi elementami konstrukcji.

W ramach przygotowywania badań, zaprojektowano uchwyty oraz system obciążania, pozwalające generować siłę z założoną wartością, z częstotliwością około 2 Hz. Gondola w trakcie testów została zaprezentowana na rysunku 22.



Rys. 22. Widok ukośny na zmontowaną gondolę do kolei linowych, przygotowaną do przeprowadzenia badań zmęczeniowych, zgodnie z normą PN-EN 13796-3.

Od lutego 2020 brałem udział w projekcie realizowanym przez PZL „WUCH” Dębica. Prace Politechniki Rzeszowskiej były realizowane do grudnia 2022.

Projekt NCBiR SPCDM-5MWt realizowany przez WUCH Dębica (POIR.01.01.01-00-0529/19-00) dotyczył opracowania konstrukcji i technologii sprężarkowej pompy ciepła

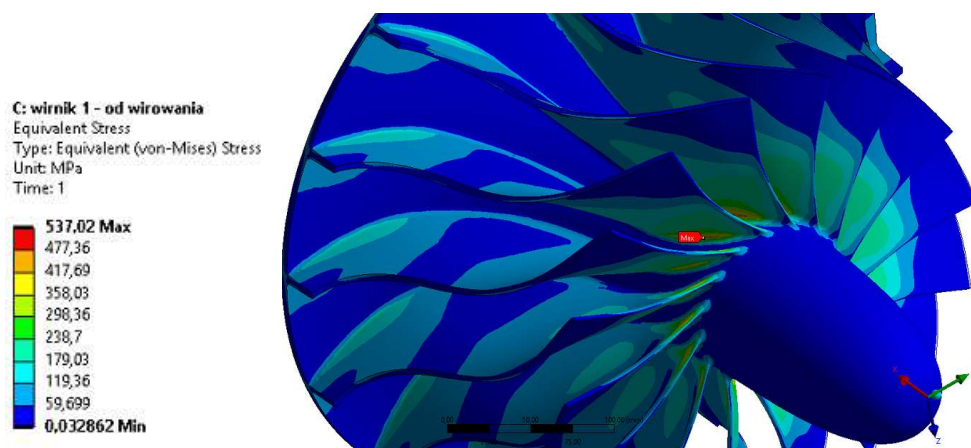
dużej mocy (SPCDM) o mocy cieplnej 5 MWt, przeznaczonej do wykorzystania energii geotermalnej jako dolnego źródła ciepła. Celem projektu było zaprojektowanie, zbudowanie i zweryfikowanie prototypowych rozwiązań sprężarkowych oraz kompletnej technologii urządzenia o wysokiej sprawności eksploatacyjnej (docelowo $COP > 4$) i parametrach odpowiadających najlepszym dostępnym technikom (BAT).

W ramach prac opracowano koncepcję konstrukcyjną sprężarki i układu pompy ciepła, przeprowadzono badania przemysłowe i prace rozwojowe obejmujące modelowanie termodynamiczne i hydromechaniczne, dobór materiałów i elementów konstrukcyjnych oraz opracowanie procesu technologicznego montażu i badań prototypu. Zrealizowano prace eksperymentalne nad prototypem sprężarkowym oraz badania wydajnościowe układu w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych, zweryfikowano parametry sprawnościowe i straty ciśnienia oraz dopracowano systemy sterowania i zabezpieczeń.

Projekt obejmował też opracowanie dokumentacji technologicznej i wdrożeniowej niezbędnej do produkcji seryjnej oraz analizę potencjału rynkowego i zastosowań przemysłowych (m.in. ciepłownictwo sieciowe, instalacje przemysłowe, systemy wykorzystujące ciepło gruntowe). Działania projektowe uwzględniały wymagania środowiskowe i efektywność energetyczną, a także aspekt komercjalizacji wyników.

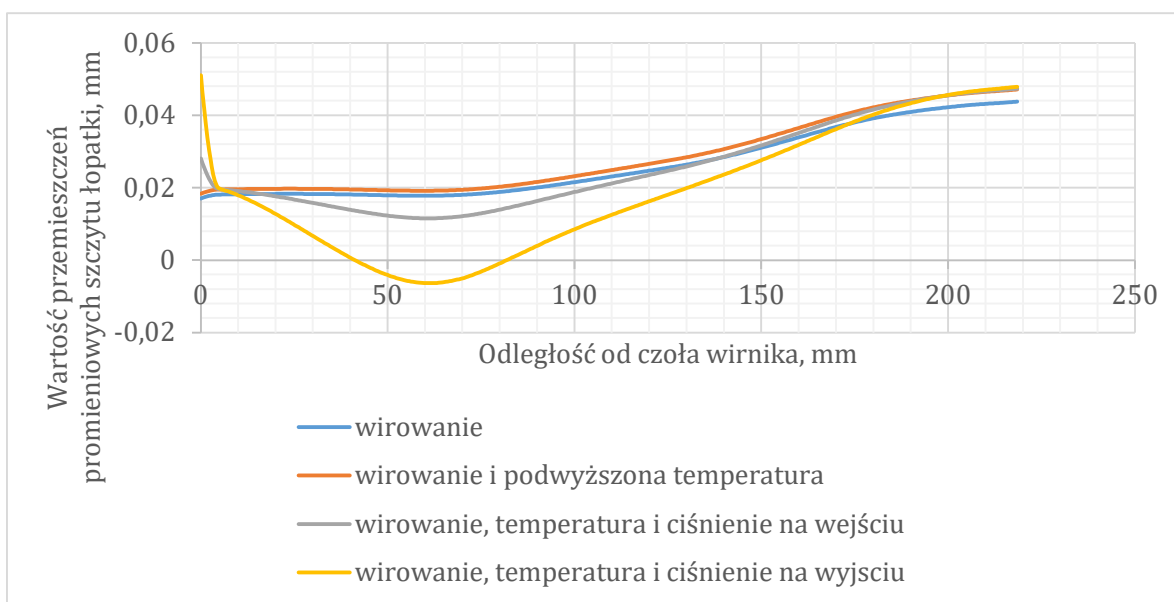
Realizacja projektu była finansowana w ramach programów krajowych wspierających prace B+R dla przedsiębiorstw; prace obejmowały etapy koncepcyjne, badania przemysłowe i eksperymentalne.

Jako wykonawca w omawianym powyżej projekcie, uczestniczyłem w wielu zespołach realizujących działania, ale najważniejsze dotyczyły projektowania zespołu dwustopniowej sprężarki do zastosowań wspomnianych zastosowań. W ramach tej aktywności przeprowadziłem złożone analizy wytrzymałościowe, weryfikujące stan naprężeń (rys. 23), w celu przeprowadzenia oceny trwałości wirnika.

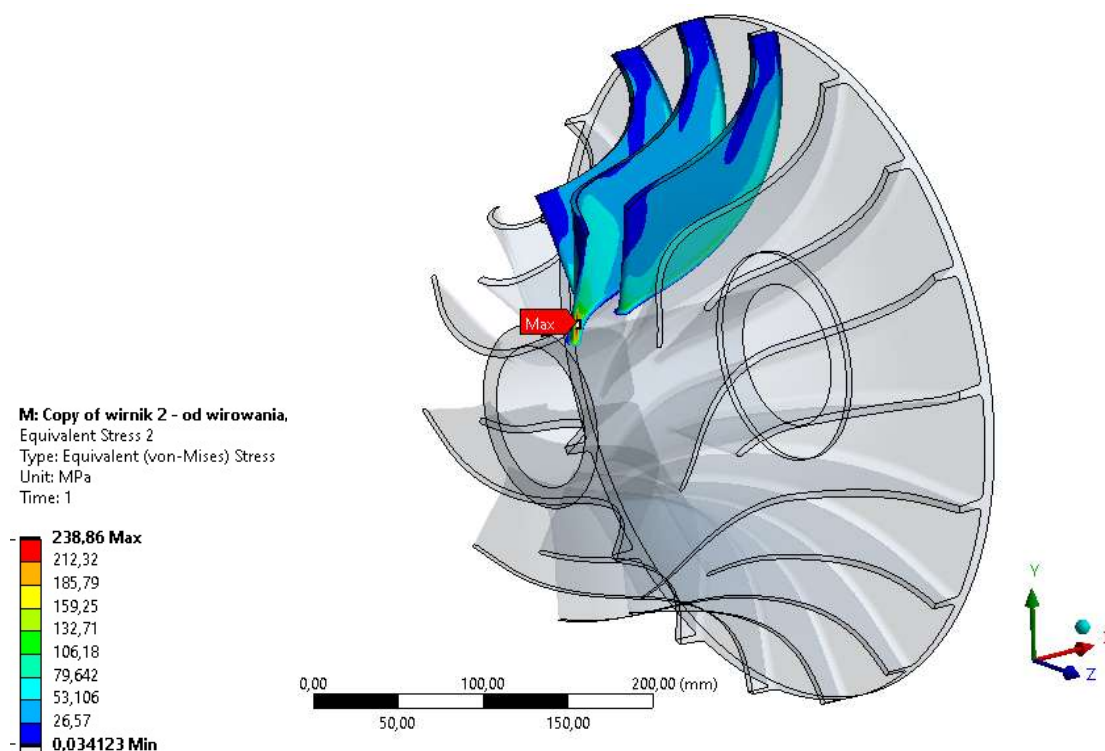


Rys. 23. Rozkład naprężeń zredukowanych (według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego) dla wirnika 1-WUCH, przy obciążeniu wyłącznie prędkością obrotową.

Dodatkowo, prace dążyły do określenia deformacji wirnika w celu zaprojektowania i doboru luzów wierzchołkowych w obudowie. Przykład otrzymanych wartości zaprezentowano na rysunku 24 i 25.



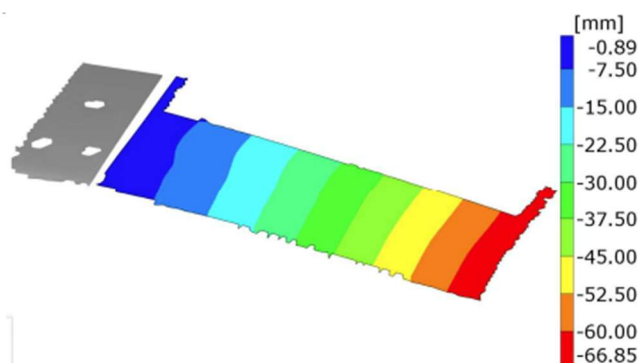
Rys. 24. Rozkład wartości przemieszczeń promieniowych szczytu łopatki (mm) dla wirnika 1-PRz, wykonanego ze stali stopowej 40H QT, w zależności od rodzaju obciążenia.



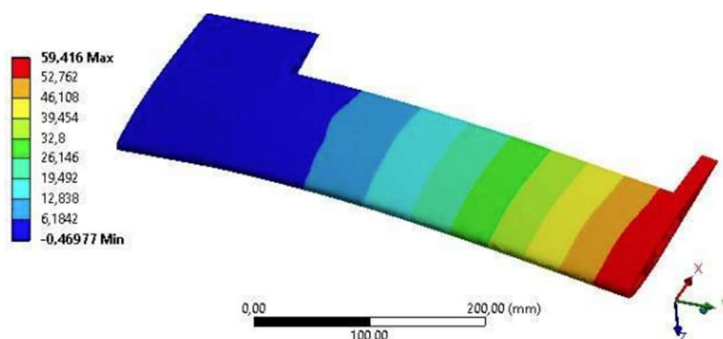
Rys. 25. Rozkład naprężeń zredukowanych (według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego) dla wirnika 2-WUCH, przy obciążeniu prędkością obrotową, temperaturą i ciśnieniem na wejściu na stopień.

Byłem również wykonawcą w projekcie LIDER 4 (LIDER/011/443/L-4/12/NCBR/2013) realizowanym przez dr. inż. Łukasza Świącha z Politechniki Rzeszowskiej (mój udział był w okresie od października 2014 do grudnia 2016), który

koncentrował się na opracowaniu lekkich, cienkościennych struktur nośnych o integralnym usztywnieniu, przeznaczonych do zastosowań lotniczych. Celem projektu było połączenie analiz numerycznych i badań eksperymentalnych w celu optymalizacji geometrii oraz technologii wytwarzania takich elementów, z uwzględnieniem nowoczesnych metod przyrostowych, w tym druku 3D. W ramach prac opracowano modele materiałowe, przeprowadzono analizy wytrzymałościowe (rysunek 26 i 27) i stabilnościowe (w kontekście wyboczenia), a także zdefiniowano procesy produkcyjne umożliwiające redukcję masy przy zachowaniu wymaganej nośności. Projekt uzyskał finansowanie z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER, a jego wyniki mogą znaleźć zastosowanie w konstrukcjach samolotów, bezzałogowych statków powietrznych oraz innych lekkich struktur lotniczych.



Rys. 26. Deformacja skrzydła kompozytowego, przy obciążeniu 85 N.

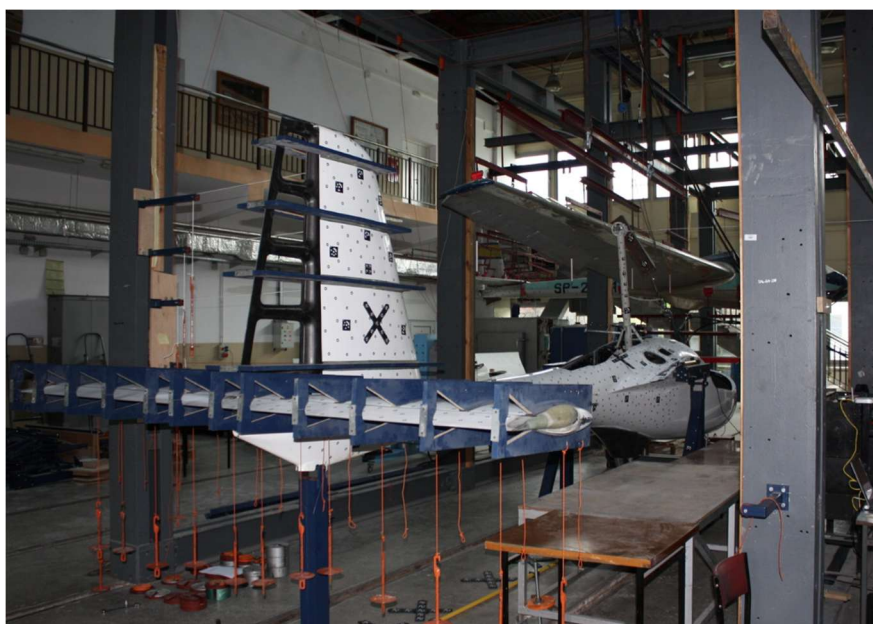


Rys. 27. Deformacja skrzydła drukowanego, przy obciążeniu 85 N.

Jako podwykonawca brałem udział w projektowaniu bezzałogowego statku powietrznego, wnosząc rozwiązania konstrukcyjne i udział w wyborze konfiguracji skrzydeł. Wspierałem opracowanie technologii kompozytowych oraz procesów wytwarzania skrzydeł drukowanych, definiując materiałowe wymagania, sekwencje sklejanego i parametry druku FDM. Przeprowadziłem analizy numeryczne obejmujące modelowanie strukturalne, analizę modalną i symulacje naprężeń dla wariantów kompozytowego (rys. 26) i drukowanego skrzydła (rys. 27). Na podstawie wyników obliczeń zaproponowałem korekty geometrii i układu wzmocnień w celu zwiększenia sztywności i zmniejszenia masy. Zorganizowałem i wykonałem badania eksperymentalne prototypowych skrzydeł, w tym testy wytrzymałościowe i pomiary odkształceń pod obciążeniem, walidując modele numeryczne i weryfikując kryteria przyjętej nośności. Dla skrzydła wykonanego metodą FDM ustaliłem optymalne ustawienia procesu druku

i parametry postprocessingu, aby zredukować wady warstwowe wpływające na wytrzymałość. Wyniki badań posłużyły do opracowania końcowych wytycznych technologicznych oraz rekomendacji konstrukcyjnych, które wdrożyliśmy w kolejnych iteracjach projektu.

Jako pracownik Katedry Silników Lotniczych i Kosmicznych, uczestniczyłem w testach wytrzymałościowych motoszybowca AOS H2 (rys. 28), będącego efektem projektu realizowanego na Wydziale Budowa Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Projekt AOS H2 był realizowany jako konsorcjum naukowo-przemysłowe kierowane przez Politechnikę Rzeszowską przy udziale Politechniki Warszawskiej, Akademii Górniczo-Hutniczej oraz Zakładu Szybowcowego „Henryk Mynarski” w Jeżowie Sudeckim, a jego celem było zaprojektowanie i zbudowanie motoszybowca z hybrydowym napędem wodorowym opartym na ogniwie paliwowym, opracowanie i integracja innowacyjnego układu napędowego oraz weryfikacja rozwiązań poprzez próby stanowiskowe i lotniskowe. W ramach prac wykonano analizy koncepcji dystrybuowanej energii, badania statyczne struktury płatowca, testy mobilne i próby kołowania oraz rozbiegu na lotnisku, a projekt doprowadził do powstania prototypowego motoszybowca AOS H2 i przeprowadzenia serii badań potwierdzających poprawność zastosowanych rozwiązań napędowych i konstrukcyjnych.



Rys. 28. Szybowiec AOS H2 w trakcie badań statycznych usterzenia poziomego [źródło: <https://w.prz.edu.pl/uczelnia/aktualnosci/proby-statyczne-motoszybowca-aos-h2-1317.html>]

7.3. Staże, studia podyplomowe, udział w szkoleniach lub warsztatach.

Oprócz dwóch staży dydaktycznych (Sudwestfalen Fachhochschule w Soest, Niemcy oraz Polytechnic School of the University of Sao Paulo, Brazylia) zrealizowanych w ramach programu Erasmus+, odbyłem 6-cio miesięczny staż Lehigh University (Bethlehem, PA, USA) w ramach stypendium Junior Research Award Polsko-Amerykańskiej Komisji Fulbrighta w okresie wrzesień 2018 – marzec 2019. Jako wizytujący naukowiec, zajmowałem się analizami wytrzymałościowymi (MES)

i przepływowymi (CFD) stopnia sprężarki osiowej i ośrodkowej, a także wpływem parametrów pracy na trwałość zmęczeniową. Równolegle prowadziłem dodatkowe badania z zakresu naprężeń szczątkowych i wpływu kulowania na żywotność łopatek.

W okresie od 04.01.2021r. do 30.04.2021r. odbywałem 4-ro miesięczny staż na stanowisku „Stażysty Projektu B+R” w firmie TT Soft. Zadania realizowane w ramach stażu związane były o doradztwem naukowym przy pracach B+R, analizie otrzymywanych wyników, wspieraniu procesu programowania oraz uczestnictwo w wykonywaniu dokumentacji technicznej.

W okresie marzec 2013 – czerwiec 2014 odbywałem staż produkcyjny w zakładach Pratt&Whitney Rzeszów, w trakcie którego zaznajamiałem się ze strukturą zakładu, jego produktami, procesami jakie są związane z produkcją silników lotniczych a także weryfikacją jakości produkowanych części i obiegiem dokumentów.

Ważnym aspektem rozwoju jako naukowca było również rozwijanie wiedzy i kompetencji niezbędnych do zarządzania projektami. W maju 2021 ukończyłem program *Management in Engineering: Strategy and Leadership* na Massachusetts Institute of Technology (w ramach kursów online MITx). W podobny sposób ukończyłem program *Introduction to Aerospace Structures and Materials*, organizowany przez Delft University of Technology (certyfikat z 15 maja 2019 roku).

W okresie od 12.01.2022 do 22.09.2022r. byłem uczestnikiem programu Akceleracji Przedsiębiorczości Akademickiej – Science Startup, organizowanego przez Podkarpackie Centrum Innowacji.

Ponadto odbyłem szkolenia (ukończone zaświadczeniami):

- Zarządzanie projektami dla początkujących (Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, certyfikat, 2023);
- Menadżer transferu technologii (PCI, certyfikat, 2022);
- Zarządzanie procesem B+R, wdrażanie rozwiązań B+R, wdrażanie innowacji; (INVESTIN i PCI, certyfikat, 2022);
- Pitching – prezentacja projektu biznesowego przed inwestorem (PCI, certyfikat, 2022)
- Pozyskiwanie funduszy (Mamet, zaświadczenie, 2014);
- Obrabiarki sterowane numerycznie (DLAKADR.PL, zaświadczenie, 2014);
- Ansys Mechanical:
 - Geometria i siatki (MESCO, dyplom, 2016);
 - Zagadnienia nieliniowe i kontakt w MES (MESCO, dyplom, 2019);
 - Wprowadzenie do analiz kompozytów - ACP (MESCO, dyplom, 2019);
- Ansys Fluent:
 - Wprowadzenie do analiz przepływów w Ansys Fluent (MESCO, dyplom, 2016);
 - Modelowanie procesu spalania (Symkom, zaświadczenie, 2021);
- Hyper Works – kurs podstawowy Hypermesh (Endego, certyfikat, 2023);
- Basic of VBA in Excel (EFFECT Polska, certyfikat, 2024);
- Python w analizie danych z ANSYS (NobleProg, certyfikat, 2024);
- Wprowadzenie do pracy w środowisku Matlab (Politechnika Rzeszowska, zaświadczenie, 2025).

7.4. Dodatkowe doświadczenia zawodowe.

Od października 2023 pracuję jako starszy inżynier analiz mechanicznych (Senior Mechanical Design Engineer) w Safran Aircraft Engines Poland, pracując przy obecnych i przyszłych produktach grupy Safran. Wcześniej, między lutym a wrześniem 2023, pracowałem jako doświadczony analityk naprężeń (Experienced Stress Analyst) w Boeing Poland. Wcześniej, w okresie między 2019 a 2022, współpracowałem z firmą Stowarzyszenie B4, jako specjalista d.s. MES, analiz wytrzymałościowych i projektowania konstrukcji.

.....
(podpis wnioskodawcy)