
RECENZJA

Recenzja dorobku naukowego oraz osiągnięć naukowych w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych dra inż. Arkadiusza Stefana Bednarza

Niniejsza opinia została opracowana w związku z postępowaniem w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego dr. inż. Arkadiuszowi Stefanowi Bednarzowi, wszczętym na podstawie wniosku z dnia 11.02.2026 r., złożonego za pośrednictwem Rady Doskonałości Naukowej. Postępowanie prowadzone jest w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a jednostką właściwą do jego przeprowadzenia jest Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza.

Głównym przedmiotem recenzji jest ocena osiągnięcia naukowego oraz istotnej aktywności badawczej, dydaktycznej i organizacyjnej Wnioskodawcy. Podstawę oceny stanowi przedłożone przez Habilitanta – zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2 Ustawy – osiągnięcie naukowe zatytułowane:

„Ocena wpływu warunków pracy, geometrii i technologii wykonania na wytrzymałość zmęczeniową sprężarki z silnika lotniczego”.

Na zadeklarowane osiągnięcie naukowe składają się trzy integralne elementy:

- Autorska monografia naukowa pt. **„Wpływ warunków pracy i technologii wykonania na wytrzymałość zmęczeniową łopatek sprężarki osiowej”** (Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2025).
- Cykl 9 powiązanych tematycznie artykułów naukowych pod wspólnym tytułem: **„Ocena wpływu warunków pracy, geometrii i technologii wykonania na wytrzymałość zmęczeniową sprężarki z silnika lotniczego”.**
- Jedno oryginalne osiągnięcie projektowe o charakterze konstrukcyjnym i technologicznym **„Turboalternator lotniczy zintegrowany z bębniem/wałem i statorem sprężarki”.**

Podstawą materialną opracowania niniejszej opinii są kompletne dokumenty przedłożone przez Kandydata, obejmujące w szczególności: wniosek habilitacyjny, autoreferat, wykaz osiągnięć naukowych, dydaktycznych i organizacyjnych, dokumentację osiągnięcia projektowego, a także publikacje naukowe oraz monografię habilitacyjną.

Recenzja składa się z mojej odpowiedzi na trzy warunki zawarte w Art. 219. prawa o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U.2023.0.742, tj.:

1. Czy Kandydat posiada stopień doktora?
2. Czy Kandydat posiada w dorobku osiągnięcia naukowe, stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna?
3. Czy Kandydat wykazuje się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej?

Na zakończenie zawarłem wniosek końcowy.

1. Weryfikacja posiadania stopnia doktora przez Kandydata

Na podstawie załączonych dokumentów stwierdzam, że dr inż. Arkadiusz Stefan Bednarz posiada stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Stopień ten został nadany w 2019 roku przez Politechnikę Rzeszowską im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa. Rozprawa doktorska pt. „*Numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz trwałości zmęczeniowej łopatek z uszkodzeniami w zakresie drgań rezonansowych*” dotyczyła ważnego zagadnienia z obszaru wytrzymałości zmęczeniowej elementów wirnikowych silników lotniczych. Promotorem pracy był dr hab. inż. Lucjan Witek, prof. PRz, natomiast promotorem pomocniczym dr inż. Łukasz Świąch.

Studia drugiego stopnia (magisterskie) Kandydat ukończył w 2014 roku na Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza na kierunku **lotnictwo i kosmonautyka**, uzyskując tytuł zawodowy magistra inżyniera. Praca magisterska dotyczyła **analizy wytrzymałościowej łopatki sprężarki silnika turbinowego**. Wcześniej, w 2013 roku, uzyskał **tytuł inżyniera** na tym samym kierunku, realizując pracę dotyczącą **modelowania silnika turbinowego**. Ponadto w 2016 roku uzyskał **drugi tytuł inżyniera** na Uniwersytecie Rzeszowskim na kierunku **mechatronika**, co wskazuje na poszerzenie kompetencji o aspekty systemowe i sterowania.

Doświadczenie naukowe i zawodowe Kandydata obejmuje również współpracę z przemysłem lotniczym, w tym zatrudnienie i współpracę z przedsiębiorstwami takimi jak **Boeing Poland** oraz **Safran Aircraft Engines Poland**, a także udział w projektach realizowanych wspólnie z **Pratt & Whitney Rzeszów**. Ponadto Kandydat uczestniczył w pracach o charakterze strategicznym, m.in. w ramach **Partnerstwa Wodorowego** przy Ministerstwie Klimatu i Środowiska, co świadczy o jego aktywności w obszarze badań stosowanych i wdrożeniowych.

Istotnym elementem rozwoju naukowego Kandydata są również zagraniczne staże i aktywność międzynarodowa, w tym udział w programie **Fulbrighta** oraz mobilności **Erasmus+**, m.in. na **University of São Paulo**, gdzie prowadził wykłady i rozwijał współpracę naukową.

Podsumowując, na podstawie przedłożonej dokumentacji jednoznacznie stwierdzam, że dr inż. Arkadiusz Stefan Bednarz **spełnia pierwszy warunek** określony w art. 219 ust. 1 ustawy, tj. posiada stopień doktora nadany w dyscyplinie odpowiadającej przedmiotowi postępowania habilitacyjnego.

2. Ocena osiągnięcia naukowego stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny

Zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy, dr inż. Arkadiusz Stefan Bednarz przedstawił jako główne osiągnięcie naukowe dzieło złożone z trzech integralnych elementów: autorskiej monografii naukowej, cyklu dziewięciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych oraz jednego oryginalnego osiągnięcia projektowego. Osiągnięcie to zostało ujęte pod wspólnym tytułem: „**Ocena wpływu warunków pracy, geometrii i technologii wykonania na wytrzymałość zmęczeniową sprężarki z silnika lotniczego**”. Monografia habilitacyjna została wydana w roku 2025 przez Oficynę Wydawniczą Politechniki Rzeszowskiej, liczy 233 strony i nosi tytuł „**Wpływ warunków pracy i technologii wykonania na wytrzymałość zmęczeniową łopatek sprężarki osiowej**”. Z kolei cykl artykułów obejmuje publikacje z lat 2019–2023, a ich łączna wartość punktowa według wykazu przedłożonego przez Habilitanta wynosi 927 punktów MEiN. Już sam sposób zdefiniowania osiągnięcia wskazuje, że nie jest to przypadkowy zbiór publikacji, lecz konsekwentnie budowany program badawczy, prowadzony od poziomu modeli materiałowych i zmęczeniowych, przez analizę rzeczywistych warunków eksploatacji, aż po wątki konstrukcyjne, przepływowe i wdrożeniowe.

Na wstępie należy podkreślić, że problematyka podjęta przez Habilitanta ma wysoką rangę naukową i aplikacyjną w obrębie inżynierii mechanicznej. Łopatki sprężarek osiowych i odśrodkowych należą do najbardziej obciążonych elementów współczesnych silników lotniczych. Ich praca odbywa się w warunkach jednoczesnego oddziaływania sił odśrodkowych, obciążeń aerodynamicznych, drgań rezonansowych, zmian temperatury, a także losowych uszkodzeń typu FOD. Oznacza to, że rzeczywista ocena ich trwałości nie może sprowadzać się do prostego sprawdzenia warunku wytrzymałości statycznej, lecz musi obejmować wielofizyczne sprzężenie zjawisk materiałowych, dynamicznych, przepływowych i technologicznych. Dołączona analiza stanu wiedzy trafnie wskazuje, że właśnie ten obszar stanowi obecnie jeden z najważniejszych frontów badawczych w lotniczej mechanice konstrukcji, ponieważ dotyczy elementów decydujących jednocześnie o bezpieczeństwie lotu, niezawodności silnika i możliwościach dalszej redukcji masy konstrukcji.

Autorska monografia habilitacyjna została skonstruowana w sposób dojrzały i bardzo dobrze przemyślany. Już sam układ treści pokazuje, że Autor nie ograniczył się do wąskiego ujęcia jednego wycinka zagadnienia, lecz świadomie ujął problem w szerokiej perspektywie. Monografia prowadzi czytelnika od stanu wiedzy, obejmującego bezpieczeństwo lotnicze, aspekt wytrzymałościowy, aspekt przepływowy, kulowanie, powłoki i możliwości druku 3D, poprzez modele materiałowe izotropowe, ortotropowe i anizotropowe, następnie przez szacowanie danych zmęczeniowych, eksperymentalne badania zmęczeniowe, projektowanie i inżynierię odwrotną stopnia sprężarki, obliczenia analityczne i numeryczne łopatki, aż po ocenę wpływu obróbki powierzchniowej i technologii przyrostowych. Taki układ jest z punktu widzenia recenzenta bardzo wartościowy, ponieważ dowodzi, że Habilitant nie rozumie trwałości zmęczeniowej jako odizolowanego parametru materiałowego, lecz jako wynik współdziałania geometrii, obciążeń, właściwości materiału, technologii wykonania i realnych warunków pracy. To jest właśnie sposób myślenia charakterystyczny dla dojrzałej inżynierii mechanicznej.

Szczególnie trafnie sformułowano cele naukowe monografii. Habilitant założył określenie wpływu temperatury na właściwości zmęczeniowe stopu martenzytycznego w kontekście obliczeń metodą lokalnego odkształcenia $\epsilon-N$, weryfikację wpływu temperatury pracy na analityczne modele zmęczeniowe, porównanie danych analitycznych i eksperymentalnych, wykorzystanie inżynierii odwrotnej do budowy modelu geometrycznego łopatki, ocenę wpływu wirowania, temperatury i obciążeń aerodynamicznych na stan naprężeń i trwałość, zbadanie wpływu obróbki powierzchniowej

na stan uplastycznienia i pole naprężeń szczątkowych, ocenę wpływu tych naprężeń na trwałość, a także zbudowanie modelu ortotropowego łopatki wykonanej metodą SLM. Dodatkowo Autor przyjął cel dalszoplanowy, którym było usystematyzowanie i zestawienie wybranych aspektów technologiczno-mechanicznych wpływających na trwałość łopatek. Tak zdefiniowany program badawczy ma dwa istotne walory. Po pierwsze, jest wewnętrznie spójny. Po drugie, odpowiada realnym lukom poznawczym, które Autor sam wyraźnie identyfikuje, wskazując brak syntetycznego opracowania obejmującego równolegle materiał, obciążenie, rezonans, obróbkę powierzchniową i technologie addytywne w odniesieniu do sprężarek lotniczych.

Wysoko oceniam także to, że monografia nie ma charakteru wyłącznie kompilacyjnego. Z jej streszczenia i podsumowania wynika, że Habilitant nie tylko zebrał rozproszoną wiedzę, ale przedstawił zbiór własnych wyników: zależne od temperatury dane materiałowe, mapy rozkładów naprężeń i przemieszczeń dla różnych wariantów materiału i orientacji SLM, wartości naprężeń szczątkowych po kulowaniu oraz zweryfikowany algorytm obliczeń zmęczeniowych służący do prognozowania liczby cykli do inicjacji pęknięcia. Wnioski monografii prowadzą do rekomendacji projektowych i technologicznych, odnoszących się do stosowania obróbki powierzchniowej, doboru modeli zmęczeniowych i wykorzystania modelu ortotropowego SLM w dalszych procedurach certyfikacyjnych komponentów lotniczych. Oznacza to, że monografia ma nie tylko walor porządkujący, ale również projektowy i decyzyjny, co należy uznać za jej mocną stronę.

Dołączona analiza dorobku naukowego bardzo trafnie uwypukla, że zasadnicza wartość tego osiągnięcia polega na ujęciu łopatki sprężarki jako elementu pracującego w złożonym stanie obciążenia, którego nie da się poprawnie ocenić bez sprzężenia mechaniki ciała stałego z mechaniką płynów. Zwrócono tam uwagę na superpozycję obciążeń odśrodkowych, aerodynamicznych i termicznych, na konieczność stosowania analiz FSI oraz na fakt, że drgania rezonansowe pozostają głównym mechanizmem inicjacji uszkodzeń wysokocyklowych. To istotne spostrzeżenie, bo pozwala właściwie osadzić prace dra Bednarza na tle światowych trendów. Nie jest to badanie wąskiego, laboratoryjnego problemu, lecz odpowiedź na centralny problem konstrukcji lotniczych: jak modelować i wydłużyć życie elementu krytycznego, który pracuje równocześnie jako część układu aerodynamicznego, dynamicznego i materiałowego.

Przed tą monografią światowa literatura dysponowała już rozproszoną wiedzą w kilku osobnych nurtach: istniały publikacje o zmęczeniu łopatek, osobno o wpływie temperatury na właściwości materiałów, osobno o *shot-peeningu*, osobno o rezonansie i osobno o ortotropii materiałów wytwarzanych metodami przyrostowymi. Brakowało jednak jednego syntetycznego opracowania, które **równolegle i w jednym ciągu badawczym** spinałoby: materiał, temperaturę, geometrię, inżynierię odwrotną, obciążenia odśrodkowe, aerodynamiczne i cieplne, rezonans, kulowanie, naprężenia szczątkowe oraz modelowanie ortotropowe łopatki z druku 3D. Sam Habilitant w autoreferacie wskazuje właśnie taki brak syntetycznego ujęcia jako jedną z luk poznawczych, które chciał wypełnić.

Habilitant wniósł zintegrowane, interdyscyplinarne opracowanie budujące **jeden spójny model** myślenia o trwałości łopatki sprężarki osiowej. Monografia nie ogranicza się do przeglądu, lecz obejmuje własny program badawczy: dobór materiału, próby rozciągania z uwzględnieniem temperatury, opracowanie modeli zmęczeniowych zależnych od temperatury, eksperymenty trwałościowe, implementację kodu obliczeniowego do analiz niskocyklowych, budowę geometrii łopatki metodą inżynierii odwrotnej, analityczne i numeryczne wyznaczenie stanów naprężeń, ocenę wpływu obciążeń bezwładnościowych, aerodynamicznych i cieplnych, analizę rezonansu, ocenę *shot-peeningu* oraz model ortotropowy łopatki wykonanej metodą SLM. Autor wskazał też różnice deformacyjne wynikające z kierunku druku i zastosowania modelu ortotropowego.

Monografia **poszerza** zatem wiedzę światową przede wszystkim na poziomie integracji wiedzy i metodologii. Nie dlatego, że odkrywa pojedyncze nowe prawo fizyczne, ale dlatego, że **łączy** dotąd rozdzielone obszary w jeden użyteczny, obliczalny i inżyniersko spójny program oceny trwałości łopatek lotniczych. W tym sensie dr Bednarz przesunął wiedzę z poziomu „częściowych odpowiedzi” do poziomu całościowego modelu analizy komponentu krytycznego. Taki wkład ma znaczenie światowe, bo w lotnictwie realny postęp bardzo często polega nie na jednostkowym odkryciu, lecz na stworzeniu procedury pozwalającej lepiej projektować i oceniać bezpieczeństwo elementu wysoko odpowiedzialnego.

Cykl **dziwięciu** artykułów układa się, w mojej ocenie, w **trzy logiczne bloki badawcze**. Pierwszy obejmuje **problematykę modeli zmęczeniowych**, rezonansu i uszkodzeń typu FOD. Drugi dotyczy **wpływu obróbki powierzchniowej**, zwłaszcza shot-peeningu, oraz roli naprężeń szczątkowych. Trzeci rozszerza perspektywę na **zagadnienia przepływowe i systemowe**, w tym wpływ uproszczeń modelowania obciążeń aerodynamicznych, wpływ rzeczywistych obciążeń przepływowych na częstotliwości rezonansowe oraz wpływ geometrii wirnika sprężarki odśrodkowej na parametry pracy silnika. Ta architektura cyklu jest uzasadniona merytorycznie. Oś główna pozostaje ta sama: zależność pomiędzy geometrią, obciążeniem, materiałem, stanem naprężeń i skutkami eksploatacyjnymi. Różni się jedynie poziom ujęcia problemu: od lokalnego karbu w łopatce do poziomu zespołu sprężarkowego i jego wpływu na pracę jednostki napędowej.

Publikacja **A1**, opublikowana w Journal of KONES w roku 2019, stanowi ważny punkt wyjścia dla całego programu badawczego. Habilitant badał w niej wpływ modelu umacniania cyklicznego na wyniki numerycznej analizy zmęczeniowej łopatki sprężarki z karbem typu V na krawędzi natarcia. Zastosowano tu model geometryczny łopatki silnika PZL-10W wykonanej ze stopu EI-961 oraz metodę ϵ -N. Istotą pracy było wykazanie, że wybór modelu konstytutywnego materiału ma bezpośredni wpływ na dokładność prognozowanej trwałości. To ważny problem metodologiczny, często niedoceniany w praktyce inżynierskiej, gdzie pokusa wykorzystania „domyślnych” parametrów materiałowych bywa bardzo duża. Dr inż. Arkadiusz Bednarz trafnie pokazał, że nieuwzględnienie umacniania cyklicznego prowadzi do niedoszacowania naprężeń i odkształceń w rejonie defektu, a w konsekwencji do błędnej oceny rezerwy. Nie jest to jeszcze praca o największym zasięgu, ale ma duże znaczenie jako fundament metodyczny dalszych analiz.

Wcześniej było wiadomo, że do analiz ϵ -N łopatek z defektami stosuje się modele zmęczeniowe i modele umacniania cyklicznego, ale praktyka inżynierska często traktowała wybór modelu umacniania jako element techniczny, a nie jako źródło zasadniczych różnic w wyniku prognozy trwałości. Znane były też wcześniejsze prace nad łopatkami z uszkodzeniami wstępnymi, ale brakowało przejrzystego pokazania, jak bardzo sam dobór modelu umacniania cyklicznego zmienia wynik numerycznej oceny życia zmęczeniowego konkretnej łopatki silnika lotniczego.

Dr inż. Arkadiusz Bednarz przeprowadził analizę na rzeczywistym obiekcie inżynierskim. Porównał trzy modele umacniania cyklicznego i pokazał, że wynik numerycznej prognozy życia zmęczeniowego jest od nich wyraźnie zależny. Wniosek był jednoznaczny: nieuwzględnienie umacniania cyklicznego prowadzi do niedoszacowania naprężeń i odkształceń w obszarze defektu, a więc do błędnej oceny trwałości.

Poszerzenie wiedzy światowej polegało tutaj na metodycznym doprecyzowaniu wiarygodności analiz ϵ -N dla łopatek z defektem. Habilitant pokazał na konkretnym, istotnym lotniczo przypadku, że wybór modelu konstytutywnego jest czynnikiem krytycznym dla bezpieczeństwa prognozy. To poszerzenie wiedzy ma charakter fundamentalny dla praktyki CAE: przesuwając środek ciężkości z samej geometrii i obciążenia na poprawność odwzorowania odpowiedzi materiału pod obciążeniem

cyklicznym. Innymi słowy, światowa wiedza została tu **powiększona** przez ilościowe wykazanie skali błędu, jaki generuje **nieadekwatny** model umacniania.

Publikacja **A2**, również jednoautorska, pt. ***Evaluation of Material Data to the Numerical Strain-Life Analysis of the Compressor Blade Subjected to Resonance Vibrations***, jest moim zdaniem jedną z **najistotniejszych metodologicznie prac** w całym cyklu. Już sam jej tytuł pokazuje przesunięcie ciężaru z samego modelu konstytutywnego na jakość danych wejściowych do analizy *strain-life*. W świetle dołączonej analizy problem ten ma znaczenie wręcz fundamentalne, ponieważ dla stopu EI-961 badano liczne estymacje modeli materiałowych oraz różne warianty równań Mansona-Coffina-Basquina i Ramberga-Osgooda. Innymi słowy, Habilitant dotyka tu jednego z najtrudniejszych obszarów praktycznej mechaniki zmęczenia: nie wystarczy mieć poprawny algorytm obliczeniowy, jeśli parametry materiałowe zostały oszacowane niewłaściwie. Wartość tej pracy polega na tym, że porządkuje ona czułość wyników na przyjęte dane, a więc daje środowisku inżynierskiemu informację, gdzie faktycznie znajdują się największe źródła błędu. To jest wkład bardziej wartościowy, niż mogłoby wynikać z samej liczby stron artykułu.

Wcześniej wiadomo było, że dane materiałowe są niezbędne dla analiz *strain-life*, ale w literaturze i praktyce przemysłowej często przyjmowano parametry oszacowane, uproszczone lub zapożyczone z baz danych bez pełnej analizy ich wpływu na wynik końcowy. Innymi słowy, istniała świadomość problemu, lecz brakowało wystarczająco jasno pokazanej czułości prognoz trwałości na wybór zestawu danych materiałowych dla łopatki pracującej w rezonansie.

Habilitant sprawdził, jak wybór danych sprężysto-plastycznych, krzywych $\epsilon-N$ i parametrów umacniania cyklicznego wpływa na prognozowaną żywotność łopatki pierwszego stopnia sprężarki PZL-10W z karbem na krawędzi natarcia. Przeprowadził porównawcze obliczenia z użyciem ośmiu metod oceny zmęczeniowej opartych na modelu Manson-Coffin-Basquin i wykazał, że różnice w danych wejściowych prowadzą do dużych odchyżeń w przewidywanej liczbie cykli do inicjacji pęknięcia. Zidentyfikował też, które parametry najmocniej determinują wynik i pokazał, że metody uwzględniające pełniejszą informację o histerezie i umacnianiu cyklicznym dają wyniki bardziej konserwatywne i spójne. Tutaj wkład dra Bednarza polega na uporządkowaniu problemu niepewności materiałowej w analizie *strain-life* elementów lotniczych. Powiększył wiedzę światową nie przez nowy model matematyczny, lecz przez pokazanie, że jakość danych materiałowych jest zmienną pierwszego rzędu, a nie technicznym detalem. Dla światowej praktyki obliczeniowej to ważne: praca dostarcza argumentu, że wiarygodność analizy trwałości zależy równie mocno od doboru danych, jak od samego modelu MES. W rezultacie wiedza światowa została tu **rozszerzona** w kierunku **standaryzacji i walidacji** danych materiałowych do prognoz zmęczeniowych komponentów lotniczych.

Publikacja **A3**, pt. ***Influence of the Amplitude of Resonance Vibrations on Fatigue Life of a Compressor Blade with Simulated FOD Damage***, stanowi naturalne rozwinięcie dwóch poprzednich prac. Habilitant przechodzi tutaj od pytania „jak modelować” do pytania „*jak reaguje realny element z uszkodzeniem przy zmianie amplitudy rezonansu*”. Zastosowano symulację karbu FOD na łopatce pierwszego stopnia sprężarki silnika PZL-10W, wykorzystano różne modele zmęczeniowe, trzy modele umacniania cyklicznego i dwa modele korekcji naprężeń średnich, a wyniki porównano z wcześniejszymi badaniami eksperymentalnymi. Zakończenie tej pracy jest szczególnie ważne. Po pierwsze, pokazano, że przy amplitudzie 2,5 mm inicjacja pęknięcia staje się już obserwowalna, podczas gdy przy niższych amplitudach nie była stwierdzana. Po drugie, wykazano, że zastosowanie korekcji naprężeń średnich może niemal podwoić prognozowaną liczbę cykli do inicjacji pęknięcia. Po trzecie, co bardzo interesujące poznawczo, uszkodzenie połączone z lokalnym uplastycznieniem może generować ściskający stan naprężenia w dnie karbu, prowadząc w pewnych konfiguracjach do pozornego wzrostu trwałości względem prostszych modeli. To właśnie taki wynik pokazuje, że

Habilitant potrafi dostrzec złożoność mechanizmów FOD i nie poprzestaje na intuicyjnym, ale uproszczonym wniosku, że każdy defekt zawsze działa tak samo.

Wcześniej nauka światowa zawierała wiedzę, że uszkodzenia FOD radykalnie obniżają trwałość łopatek i że rezonans jest jednym z głównych mechanizmów prowadzących do pęknięcia wysokocyklowego. Istniały też wcześniejsze badania eksperymentalne łopatek z uszkodzeniami wstępnymi. Nie było jednak dostatecznie przejrzystego, ilościowego powiązania pomiędzy amplitudą drgań rezonansowych, stanem naprężenia w dnie karbu FOD i liczbą cykli do inicjacji pęknięcia, z jednoczesnym porównaniem różnych modeli zmęczeniowych, modeli umacniania i korekcji naprężeń średnich.

Dr inż. Arkadiusz Bednarz pokazał, że wzrost amplitudy rezonansu istotnie zmienia pola naprężeń w rejonie karbu i prognozowaną liczbę cykli do uszkodzenia, a także że modele numeryczne mają tendencję do przeszacowywania trwałości względem eksperymentu. Jednocześnie wskazał, że lokalne uplastycznienie po udarze może generować ściskający stan naprężeń w dnie karbu, co częściowo zmienia intuicyjny obraz wpływu FOD.

Światowa wiedza została tutaj uzupełniona przez ilościowe sprzężenie trzech zjawisk: rezonansu, FOD i lokalnej nieliniowości materiałowej. Wcześniej te trzy wątki istniały, ale częściej osobno. Dr Bednarz pokazał ich współdziałanie na konkretnym przykładzie lotniczym i wykazał, że amplituda drgań jest nie tylko „skalą obciążenia”, lecz czynnikiem sterującym lokalnym stanem naprężeń i błędem prognozy modeli numerycznych. To bardzo ważne, bo pomaga lepiej rozumieć, kiedy obliczenia są nadmiernie optymistyczne i gdzie leży granica bezpieczeństwa eksploatacyjnego uszkodzonej łopatki.

Za **najmocniejszą część** całego osiągnięcia uważam blok poświęcony obróbce powierzchniowej i naprężeniom szczątkowym, a więc przede wszystkim publikacje **A4** i **A5**. W pracy A4, opublikowanej w *Materials* w roku 2020, Habilitant wraz z Wojciechem Misiołkiem przedstawił kompleksową ocenę wpływu shot-peeningu na trwałość zmęczeniową łopatki sprężarki pracującej w warunkach drgań rezonansowych. Zastosowano model geometryczny łopatki z lokalnym uszkodzeniem FOD, analizę modalną i harmoniczną, metodę strain-life opartą na równaniach Manson–Coffin–Basquin i Ramberg–Osgood, a ponadto zbadano wielkość ziaren i grubość warstwy uplastycznionej po kulowaniu. Istotny jest tu nie sam wniosek, że *shot-peening* poprawia trwałość, bo to wiadomo w sensie ogólnym od dawna, ale sposób, w jaki Bednarz ten efekt wyjaśnia. Autor powiązał lokalizację największych naprężeń z grubością warstwy uplastycznionej i zaproponował mechaniczne wytłumaczenie wzrostu trwałości, oparte na zmianie rozkładu pól naprężenia i odkształcenia. To jest już poziom badania, które nie tylko stwierdza efekt, lecz rozumie jego przyczynę.

W literaturze światowej jest znany fakt, że kulowanie wzmacnia trwałość zmęczeniową metali dzięki wprowadzeniu korzystnych naprężeń ściskających i modyfikacji warstwy wierzchniej, a jego efekt badano już szeroko dla stali, superstopów i stopów tytanu, brakowało jednak dobrze udokumentowanego, ilościowego odniesienia tego zjawiska do szczególnie złożonego przypadku łopatki lotniczej pracującej w warunkach rezonansu i dodatkowo obciążonej lokalnym uszkodzeniem typu FOD; wkład Habilitanta polegał na tym, że przeprowadził kompleksową analizę takiego właśnie przypadku, budując szczegółowy model geometryczny łopatki z karbem FOD, wykonując analizę modalną i harmoniczną, wprowadzając do modelu pola naprężeń szczątkowych po kulowaniu i oceniając trwałość metodą $\epsilon-N$, przy czym nie poprzestał na ogólnym stwierdzeniu o korzystnym działaniu shot-peeningu, lecz określił, w jakim zakresie, przy jakiej intensywności zabiegu i przy jakiej głębokości warstwy obrobionej zmieniają się pola naprężeń, odkształceń oraz przewidywana liczba cykli do inicjacji pęknięcia; w tym właśnie sensie poszerzył wiedzę światową, ponieważ przeniósł znaną wcześniej ogólną prawdę o korzystnym wpływie kulowania na grunt złożonego, granicznego problemu

lotniczego i wykazał, że efekt shot-peeningu można nie tylko jakościowo opisać, ale także ilościowo obliczyć oraz powiązać z lokalnym stanem zmęczeniowym elementu krytycznego, przesuwając tym samym stan wiedzy od poziomu stwierdzenia „*technologia pomaga*” do poziomu „*technologię można włączyć do wiarygodnego modelu oceny bezpieczeństwa łopatki sprężarki*”.

Jeszcze wyżej oceniam publikację **A5**, czyli ***Numerical and Experimental Assessment of the Effect of Residual Stresses on the Fatigue Strength of an Aircraft Blade*** opublikowaną w Materials w roku 2021. W tej pracy Habilitant osiąga najwyższy poziom dojrzałości metodologicznej, ponieważ łączy pomiar eksperymentalny, model numeryczny i interpretację fizyczną w jeden spójny ciąg badawczy. Najistotniejszym elementem było połączenie pomiarów naprężeń resztkowych uzyskanych metodą dyfrakcji rentgenowskiej z analizami MES i analizą zmęczeniową ϵ -N. Model uwzględnił rzeczywiste pole naprężeń szczątkowych jako warunek początkowy, lokalny defekt FOD oraz sekwencję obróbki powodującą relaksację naprężeń. Kandydat wykazał, że naprężenia ściskające wprowadzone przez *peening* wyraźnie obniżają amplitudę odkształceń powierzchniowych, przesuwały obszar krytyczny w głąb materiału i wydłużają przewidywaną liczbę cykli do inicjacji pęknięcia. Jednocześnie pokazano, że późniejsze operacje obróbcze częściowo redukują ten efekt poprzez relaksację naprężeń. W praktyce oznacza to, że sama informacja „*zastosowano kulowanie*” nie jest wystarczająca do poprawnej oceny trwałości. Liczy się rzeczywisty, końcowy stan naprężeń po pełnej ścieżce technologicznej. Ten wniosek ma duże znaczenie dla procesu projektowania, technologii i certyfikacji komponentów lotniczych.

Wcześniej w literaturze światowej było dobrze rozpoznane, że naprężenia szczątkowe po *shot-peeningu* mogą poprawiać trwałość zmęczeniową materiałów, a ich korzystny wpływ wiązano głównie z wprowadzeniem ściskającego stanu naprężeń w warstwie wierzchniej oraz z opóźnianiem inicjacji i propagacji pęknięć, jednak brakowało dostatecznie dobrze udokumentowanego, ilościowego powiązania rzeczywiście zmierzonych pól naprężeń szczątkowych z numeryczną oceną trwałości konkretnej łopatki lotniczej pracującej w rezonansie i dodatkowo osłabionej defektem FOD; wkład Habilitanta polegał na tym, że połączył pomiary naprężeń resztkowych uzyskane metodą dyfrakcji rentgenowskiej z analizami MES i obliczeniami zmęczeniowymi typu *strain-life*, przygotował model geometryczny łopatki z lokalnym uszkodzeniem oraz uwzględnił sekwencję obróbki powodującą relaksację naprężeń, dzięki czemu mógł nie tylko określić poziom naprężeń po *peeningu*, ale również ilościowo wykazać, że naprężenia ściskające obniżają amplitudę odkształceń powierzchniowych, przesuwały obszar krytyczny w głąb materiału i wydłużają przewidywaną liczbę cykli do inicjacji pęknięcia, przy jednoczesnym potwierdzeniu, że procesy wykończeniowe częściowo osłabiają ten efekt przez relaksację naprężeń; w tym sensie Habilitant poszerzył wiedzę światową, ponieważ przesunął stan badań od ogólnej tezy, że „*naprężenia szczątkowe po kulowaniu są korzystne*”, do poziomu **ilościowo zwalidowanego** modelu pokazującego, jak rzeczywiste, zmierzone pola naprężeń resztkowych mogą zostać wprowadzone do analizy trwałości elementu krytycznego i jak zmieniają lokalny stan zmęczeniowy łopatki lotniczej, a więc jak technologię powierzchniową można bezpośrednio powiązać z bardziej wiarygodną oceną bezpieczeństwa eksploatacyjnego.

W tym miejscu warto zaznaczyć, że dołączona analiza dorobku dobrze wzmacnia interpretację znaczenia prac A4 i A5. Wskazuje ona, że w lotnictwie inicjacja uszkodzeń zmęczeniowych zaczyna się zwykle w warstwie przypowierzchniowej, a *shot-peening* należy do absolutnie najważniejszych procesów wydłużających rewers eksploatacyjny łopatek. Wskazano również, że prawdziwe wyzwanie nie polega dziś na ogólnym stwierdzeniu korzystnego wpływu kulowania, lecz na jego ilościowym odwzorowaniu w analizie numerycznej z uwzględnieniem relaksacji naprężeń i zmian mikrostrukturalnych. Na tym tle prace dra inż. Bednarza nie są wtórnym powtórzeniem znanej tezy,

ale próbą przełożenia wiedzy technologicznej na obliczalny model inżynierski. To właśnie czyni ten fragment dorobku **najmocniejszym** naukowo.

Publikacja **A6**, pt. **Wpływ obciążeń aerodynamicznych na częstotliwość rezonansową sprężarki osiowej**, ma mniejszy ciężar formalny, ponieważ jest rozdziałem w monografii wieloautorskiej, ale nie należy jej lekceważyć. Z punktu widzenia programu badawczego pełni ona rolę ważnego pomostu między klasyczną analizą wytrzymałościową a analizą aeroelastyczną. Habilitant wskazuje tu wyraźnie, że dla rzetelnej oceny ryzyka rezonansu nie wystarcza analiza swobodna lub obciążenie jedynie siłą odśrodkową. Należy uwzględniać wpływ obciążeń aerodynamicznych na pola sztywności i masy efektywnej układu, a więc uwzględniać scenariusze zmiennego obciążenia w procedurach diagnostycznych i badaniach rezonansowych. Jako jedyny autor pracy Arkadiusz Bednarz odpowiadał za całość badań, przygotowanie i napisanie tekstu. Wartość tej publikacji polega na tym, że otwiera drogę do dwóch kolejnych, znacznie mocniejszych prac A7 i A8.

Wcześniej w literaturze światowej było wiadomo, że łopatki sprężarek pracujące w silnikach lotniczych są narażone na rezonans, a ich częstotliwości własne zależą od geometrii, materiału i prędkości obrotowej, przy czym badania eksperymentalne i numeryczne zwykle odnosiły się do warunków uproszczonych, najczęściej bez uwzględnienia rzeczywistych obciążeń aerodynamicznych działających podczas pracy sprężarki; brakowało natomiast dostatecznie dobrze udokumentowanej, ilościowej odpowiedzi na pytanie, w jakim stopniu zmienne pola ciśnień aerodynamicznych modyfikują efektywną sztywność układu wirnik-łopatka i przez to przesuwają częstotliwości rezonansowe, a sam Habilitant podkreślał, że jest to problem praktycznie niemożliwy do bezpośredniej weryfikacji eksperymentalnej i słabo rozpoznany w dotychczasowej literaturze. Wkład dra inż. Bednarza polega na tym, że opracował model dynamiczny stopnia sprężarki osiowej oraz szczegółowy model 3D łopatki wykonanej ze stopu EI-961, połączył analizy aerodynamiczne z analizami modalnymi, uwzględnił różne stany obciążenia odpowiadające zakresom pracy sprężarki, przypadki asymetrycznych pól ciśnień oraz wpływ prędkości obrotowej, a następnie wykazał, że zmiany obciążeń aerodynamicznych powodują zauważalne przesunięcia częstotliwości własnych, szczególnie w scenariuszach asymetrycznych i przy wyższych współczynnikach obciążenia, przy czym dla wybranych konfiguracji efekt ten był wystarczający, aby zbliżyć częstotliwość własną do pasm wymuszeń typowych dla pracy urządzenia i zwiększyć ryzyko wejścia w rezonans ; w tym sensie Habilitant poszerzył wiedzę światową, ponieważ przesunął stan badań od ogólnego przekonania, że aerodynamika wpływa głównie na wymuszenie drgań, do ilościowo uzasadnionego wniosku, że rzeczywiste obciążenia przepływowe współkształtują także samą charakterystykę dynamiczną łopatki i powinny być uwzględniane w ocenie ryzyka rezonansu, w projektowaniu prób rezonansowych oraz w diagnostyce drgań, a więc przekształcił ten problem z intuicyjnie rozumianego zjawiska w **obliczalny i użyteczny inżyniersko** element oceny bezpieczeństwa eksploatacyjnego sprężarek lotniczych.

Publikacja **A7**, opublikowana w Scientific Reports w roku 2022, należy do **najwyżej** ocenianych przeze mnie pozycji w całym cyklu. Autor wraz ze współpracownikami zbadał wpływ uproszczeń modelowania obciążeń na stan naprężeń i odkształceń w sprężarce odśrodkowej silnika DGEN 380. W pracy porównano kilka konfiguracji obciążeń: samo wirowanie, wirowanie z ciśnieniem na jednej stronie łopatki, wirowanie z ciśnieniem po obu stronach oraz analizę FSI traktowaną jako wariant referencyjny. Wniosek jest bardzo cenny praktycznie: w zakresie oceny naprężeń model wirowania z ciśnieniem na obu stronach łopatki daje zadowalającą zgodność z analizą referencyjną, ale wartości odkształceń pozostają przeszacowane. Oznacza to, że inżynier może czasem pozwolić sobie na pewne uproszczenie, ale musi wiedzieć, który parametr pozostaje jeszcze wiarygodny, a który już nie. To problem niezwykle istotny dla praktyki projektowej, bo pełne analizy FSI są kosztowne obliczeniowo i nie zawsze możliwe do stosowania rutynowo. Uważam, że właśnie ta praca pokazuje **dojrzałość**

Habilitanta w zakresie nie tylko modelowania, ale też oceny przydatności modeli dla praktyki przemysłowej.

Publikacja **A8**, opublikowana w *Materials* w roku 2022, rozwija wątek aeroelastyczny w odniesieniu do łopatki sprężarki wykonanej ze stopu EI-961. Celem pracy było ilościowe określenie, w jakim stopniu rzeczywiste rozkłady ciśnień aerodynamicznych modyfikują efektywną sztywność układu i przesuwają częstotliwości własne oraz postacie drgań. To bardzo ważny krok naprzód względem wcześniejszych prac, ponieważ Habilitant przechodzi od ogólnej obserwacji o znaczeniu obciążeń przepływowych do konkretnego numerycznego wykazania ich wpływu na częstotliwości rezonansowe. Badania oparto na modelu 3D łopatki i analizach łączących modele aerodynamiczne z modalnymi. Ostateczny wniosek jest jednoznaczny: rzetelna ocena ryzyka rezonansu wymaga uwzględnienia obciążeń aerodynamicznych nie tylko jako siły wymuszającej, ale również jako czynnika zmieniającego samą charakterystykę dynamiczną konstrukcji. Z punktu widzenia bezpieczeństwa lotniczego jest to wynik istotny, ponieważ oznacza, że granice rezonansowe nie są wielkością stałą, lecz zależą od stanu pracy sprężarki.

Publikacja **A9**, pt. *Numerical study on sensitivity of turbofan engine performance to blade count of centrifugal compressor impeller*, opublikowana w *Energies* w roku 2023, poszerza zakres badań o zagadnienie wpływu geometrii wirnika sprężarki odśrodkowej na parametry pracy całego silnika. Habilitant i współautorzy badali wpływ liczby łopatek wirnika na pole ciśnienia, przepływ, siły aerodynamiczne, sprawność sprężarki i ryzyko drgań. Przyjęto podejście sprzęgające CFD z analizą strukturalną i modelem cyklu napędowego. To poszerzenie tematyczne uważam za uzasadnione, ponieważ pokazuje, że Autor nie ogranicza się do lokalnego problemu łopatki jako obiektu zmęczeniowego, lecz potrafi przejść na poziom projektowania całego zespołu przepływowego. Wyniki wskazują, że liczba łopatek nie jest prostym parametrem monotonicznie poprawiającym osiągi: jej zmiana wpływa zarazem na rozkład pola ciśnień, charakter strumienia międzyłopatkowego, obciążenia promieniowe i osiowe oraz potencjalną wrażliwość dynamiczną. Z perspektywy inżynierii mechanicznej jest to ważne, bo łączy klasyczny problem wytrzymałości z problemem sprawności i poprawności aerodynamicznej.

Za bardzo ważny walor całego osiągnięcia uważam jego wyraźną ciągłość tematyczną. W czterech artykułach Habilitant był jedynym autorem, co potwierdza samodzielność badawczą. W artykułach współautorskich jego wkład jest dobrze rozpoznawalny i najczęściej obejmuje konceptualizację, przeprowadzenie lub koordynację obliczeń numerycznych, analizę wyników oraz współtworzenie tekstu. Szczególnie istotne jest to w publikacjach A7 i A8, gdzie wkład Habilitanta dotyczył samego rdzenia merytorycznego badań, a nie wyłącznie pracy technicznej. Z punktu widzenia recenzji habilitacyjnej ma to znaczenie zasadnicze, ponieważ pozwala stwierdzić, że nie jest on biernym uczestnikiem cudzych projektów, ale samodzielnym badaczem rozwijającym własny program naukowy.

Nie oznacza to jednak, że osiągnięcie jest wolne od ograniczeń. Po pierwsze, cykl publikacji nie jest całkowicie jednorodny. Jego rdzeń stanowią prace o łopatkach sprężarki osiowej, rezonansie, FOD, kulowaniu i naprężeniach szczątkowych, natomiast końcowe publikacje przesuwają ciężar w stronę sprężarek odśrodkowych i zagadnień systemowych. Nie odbieram tego jako wady dyskwalifikującej, ale jako pewne poszerzenie zakresu, które nieco osłabia zwartą jednorodność cyklu. Po drugie, siła naukowa poszczególnych publikacji jest nierówna. Największy ciężar mają artykuły w *Materials*, *Scientific Reports* i *Energies*, natomiast wcześniejsza praca w *Journal of KONES* oraz rozdział w monografii wieloautorskiej mają mniejszą wagę oddziaływania. Po trzecie, część późniejszych analiz ma charakter wyraźnie numeryczny, a ich jeszcze pełniejsza walidacja eksperymentalna mogłaby

dodatkowo wzmocnić argumentację. Są to jednak zastrzeżenia typowe dla oceny rzetelnej, a nie krytyka podważająca wartość całości.

Dostrzegam także pewną asymetrię pomiędzy monografią a cyklem artykułów. Monografia wyraźnie szerzej rozwija temat technologii przyrostowych, modelowania ortotropowego i wpływu orientacji przyrostu na rozkład naprężeń, deformację promieniową oraz częstotliwości własne łopatek wykonanej metodą SLM. W samym cyklu artykułów temat ten nie jest reprezentowany równie silnie jak zmęczenie rezonansowe, *shot-peening* czy obciążenia aerodynamiczne. Nie jest to wada, lecz raczej wskazówka, gdzie leży najsilniejszy rdzeń osiągnięcia: w obszarze modelowania zmęczenia łopatek, roli naprężeń szczątkowych i numerycznej oceny obciążeń eksploatacyjnych. Zarazem należy docenić, że monografia wyprzedza niejako cykl, rozszerzając go o perspektywiczny kierunek badań związany z ortotropią SLM, który w lotnictwie będzie nabierał coraz większego znaczenia.

Podsumowując, oceniam osiągnięcie dr inż. Arkadiusza Bednarza jako spójne, dojrzałe i naukowo wartościowe. Jego najważniejszy wkład polega na konsekwentnym rozwinięciu programu badawczego dotyczącego trwałości zmęczeniowej elementów sprężarkowych silników lotniczych w warunkach rzeczywistej pracy, z uwzględnieniem rezonansu, FOD, temperatury, obróbki powierzchniowej, naprężeń szczątkowych, obciążeń aerodynamicznych i nowoczesnych technologii wykonania. Monografia porządkuje i syntetyzuje ten obszar w sposób przekonujący. Cykl publikacji dostarcza szeregu wyników cząstkowych o dużej wartości metodologicznej i aplikacyjnej. Osiągnięcie projektowe dowodzi natomiast zdolności do konstrukcyjnego i wdrożeniowego rozwijania idei badawczych. W mojej ocenie nie jest to dorobek jedynie poprawny. Jest to dorobek wyraźnie ponadprzeciętny, posiadający cechy samodzielnego programu naukowego i stanowiący znaczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Zauważam, że dużą część cyklu stanowią **badania numeryczne**, a walidacja eksperymentalna, choć obecna i miejscami bardzo cenna, nie jest równie silna w każdym fragmencie programu badawczego. Najmocniej zwalidowane są prace o naprężeniach szczątkowych i *shot-peeningu*, gdzie pojawia się pomiar rentgenowski i powiązanie z analizą zmęczeniową, natomiast w późniejszych publikacjach dotyczących aerodynamicznych obciążeń, uproszczeń modelowania czy czułości osiągów silnika dominują modele obliczeniowe. To nie jest wada sama w sobie, bo współczesna inżynieria turbinowa siłą rzeczy opiera się na CFD, FEM i FSI, ale z recenzenckiego punktu widzenia oznacza to, że część wniosków ma charakter bardzo przekonujący obliczeniowo, lecz słabiej potwierdzony doświadczalnie. Także w analizie dołączonej do materiałów podkreślono, że pełna zgodność modelu z realnym zachowaniem elementu jest utrudniona, a klasyczne modele mają tendencję do przeszacowywania trwałości w warunkach deformacji pouderzeniowej FOD.

W części zmęczeniowej cyklu widać, że Habilitant bardzo dobrze rozpoznaje ograniczenia własnych modeli, ale właśnie to odsłania kolejną słabość: klasyczne narzędzia ϵ -N i użyte modele korekcji naprężeń średnich nie zawsze dobrze odwzorowują rzeczywiste zachowanie łopatki z deformacją pouderzeniową. Dołączona analiza dorobku wskazuje wręcz, że typowe modelowanie numeryczne miało tendencję do istotnego przeszacowywania życia zmęczeniowego względem eksperymentu. To oczywiście nie jest zarzut wobec samego badacza — przeciwnie, jest jego zasługą, że to pokazał — ale z punktu widzenia „*jak wysoko ocenić cykl*” oznacza to, że część prac odsłania jeszcze bardziej złożoność problemu niż daje pełne zamknięcie metodologiczne. Innymi słowy, cykl jest naukowo wartościowy również dlatego, że pokazuje granice obecnych modeli, ale właśnie przez to nie wszystkie problemy zostają rozwiązane do końca.

Zauważyłem również, że cykl jest miejscami bardzo silnie oparty na jednym materiale, jednym typie łopatki i ograniczonej liczbie konfiguracji geometrycznych, zwłaszcza w części dotyczącej łopatki

sprężarki osiowej ze stopu EI-961 i silnika PZL-10W. To daje dużą głębokość studium przypadku, ale ogranicza możliwość szerokiego uogólnienia wyników na inne klasy łopatek, inne stopy lotnicze, inne geometrie i inne zakresy temperatur. Z punktu widzenia wiedzy światowej jest to bardziej solidna, głęboka eksploracja dobrze zdefiniowanego przypadku niż szeroko zakrojony program obejmujący wiele materiałów i rodzin konstrukcji. Sam Habilitant w kierunkach dalszych badań wskazuje potrzebę weryfikacji uzyskanych wyników na innym przykładzie łopatki lub wirnika sprężarki odśrodkowej, co pośrednio potwierdza, że zakres obecnej walidacji nie jest jeszcze maksymalnie szeroki.

Odrębnym, ale bardzo wartościowym składnikiem osiągnięcia jest oryginalne osiągnięcie projektowe pt. **„Turboalternator lotniczy zintegrowany z bębniem/walem i statorem sprężarki”**. Projekt ten był realizowany między majem 2021 a lipcem 2022 w ramach programu **„Inkubator Innowacyjności 4.0”**, a Habilitant występował w nim jako wnioskodawca, lider pięcioosobowego zespołu i wykonawca. Uzyskał on wsparcie przedwdrożeniowe oraz 85 punktów w konkursie. Sam opis rozwiązania jest interesujący i niebanalny. Zakłada ono umieszczenie cewek indukcyjnych na bandażu wewnętrznym kierownicy sprężarki lub na kołnierzu obudowy IGV oraz magnesów na obracającym się wale lub bębnie sprężarki. W fazie rozruchu układ pracuje jako rozrusznik wspomagający osiągnięcie minimalnej prędkości obrotowej, zaś w czasie pracy ustalonej może funkcjonować jako generator energii elektrycznej. Z projektowego punktu widzenia oznacza to próbę integracji funkcji aerodynamicznej i elektromagnetycznej w obrębie tego samego zespołu wirnikowego, a więc redukcję liczby systemów pobocznych i potencjalny krok w stronę bardziej elektrycznego lub hybrydowego napędu lotniczego.

Dołączona analiza dorobku naukowego dobrze podkreśla szerszy sens tego projektu. Wpisuje go w światowy nurt **„More Electric Aircraft”** i w kierunku rozwoju zintegrowanych turbogeneratorów, rozwijanych przez największe firmy sektora lotniczego. Oczywiście w postępowaniu habilitacyjnym nie chodzi o to, by przypisywać Autorowi stworzenie nowego światowego paradygmatu, lecz by ocenić, czy posiada on zdolność przekładania wiedzy obliczeniowej i konstrukcyjnej na koncept o potencjale wdrożeniowym. W tym sensie odpowiedź jest pozytywna. Projekt turboalternatora bardzo dobrze dopełnia dorobek publikacyjny, ponieważ pokazuje, że dr inż. Arkadiusz Bednarz nie tylko analizuje obciążenia i trwałość komponentów, ale myśli systemowo o nowych architekturach napędowych.

Istota rozwiązania polega na integracji funkcji elektromagnetycznych bezpośrednio z zespołem sprężarki silnika. W projekcie przewidziano umieszczenie cewek indukcyjnych na bandażu wewnętrznym kierownicy sprężarki albo na kołnierzu wewnętrznym obudowy kierownicy wejściowej IGV, natomiast magnesów na obracającym się wale lub bębnie sprężarki. W fazie rozruchu taki układ miał pracować jako rozrusznik wspomagający osiągnięcie minimalnej prędkości obrotowej wirnika potrzebnej do uruchomienia silnika, a więc częściowo przejmować funkcję klasycznych układów pomocniczych. W fazie pracy ustalonej ten sam zespół miał produkować energię elektryczną na potrzeby płatowca i silnika, a nadwyżki energii mogłyby być gromadzone w akumulatorach, wykorzystane później przy rozruchu, do napędu dodatkowego silnika elektrycznego albo nawet do przejęcia roli turbiny niskiego ciśnienia napędzającej wentylator kanału zewnętrznego przez silnik elektryczny. W opisie projektu wskazano również możliwość wykorzystania tej energii do zasilania silników elektrycznych systemu rozproszonego.

Z punktu widzenia naukowego i technicznego jest to osiągnięcie interesujące dlatego, że nie proponuje kolejnego klasycznego generatora dołączonego do silnika, lecz przenosi funkcję elektromagnetyczną do „wnętrza układu przepływowego. W dołączonej analizie dorobku trafnie ujęto tę cechę jako próbę translacji podzespołów generujących pola magnetyczne bezpośrednio do wnętrza silnika oraz jako odejście od klasycznej architektury opartej na zewnętrznych przekładniach AGB. W tej samej analizie wskazano, że rozwiązanie wpisuje się w światowy kierunek rozwoju „More Electric

Aircraft” i architektur hybrydowo-elektrycznych, a jego sens konstrukcyjny polega na redukcji masy, ograniczaniu złożoności systemów pobocznych oraz lepszej integracji zespołu napędowego z systemem wytwarzania energii elektrycznej. W mojej ocenie właśnie tutaj leży główny potencjał naukowy tego osiągnięcia: nie tyle w pojedynczym parametrze użytkowym, ile w zaproponowaniu nowej architektury funkcjonalnej silnika, w której sprężarka staje się jednocześnie częścią układu elektromagnetycznego.

Osiągnięcie to stanowi oryginalny koncept integracyjny na styku aeromechaniki i elektromechaniki lotniczej. Nie jest to wkład typu „nowe prawo fizyczne” ani zamknięta technologia o w pełni udokumentowanej gotowości wdrożeniowej, lecz propozycja, która poszerza światową wiedzę projektową o nowy sposób myślenia o relacji między sprężarką, wałem, rozruchem i generacją energii. W dołączonej analizie dorobku podkreślono, że demonstrator zintegrowanego turboalternatora „rozszerza definicję napędu przepływowego, scalając architekturę silnika elektromagnetycznego z elementami aerodynamicznymi”, a sam projekt został osadzony w nurcie rozwoju ekologicznych, inteligentnych systemów hybrydowych. Tę ocenę uważam za zasadną, o ile zachowa się proporcje: jest to raczej oryginalne rozszerzenie przestrzeni projektowej niż już w pełni zwalidowany przełom technologiczny.

Największe zalety naukowe tego osiągnięcia widzę w czterech punktach. Po pierwsze, projekt ma charakter wyraźnie interdyscyplinarny: łączy wiedzę z zakresu budowy sprężarek, dynamiki układów wirnikowych, elektromechaniki, energetyki pokładowej i architektury lotniczych zespołów napędowych. Po drugie, proponuje odwracalny tryb pracy jednego zespołu, czyli wykorzystanie tego samego układu zarówno do rozruchu, jak i do generacji energii w locie, co z naukowego punktu widzenia jest bardzo eleganckim rozwiązaniem funkcjonalnym. Po trzecie, projekt nie został przedstawiony wyłącznie jako koncepcja abstrakcyjna, lecz powiązano go z konkretnymi korzyściami eksploatacyjnymi: zwiększeniem efektywności wytwarzania energii elektrycznej, możliwością zasilania pomocniczych elektrycznych zespołów napędowych, redukcją zużycia paliwa, ograniczeniem emisji oraz poprawą wskaźników ekonomicznych. Po czwarte, osiągnięcie ma ważny walor prognostyczny: dobrze pokazuje, że Habilitant umie przejść od klasycznej analizy sprężarki jako elementu mechanicznego do myślenia o niej jako o aktywnym członie przyszłej architektury napędu hybrydowego.

Dodałbym jeszcze jedną zaletę, bardziej subtelną, ale z punktu widzenia recenzji bardzo ważną. Projekt ten jest logicznym rozwinięciem całego wcześniejszego profilu badawczego dra inż. Arkadiusza Bednarza. Habilitant zajmował się łopatkami, sprężarkami, stanem obciążeń, geometrią wirników i ich trwałością, a tutaj przechodzi do poziomu architektury systemowej. To oznacza, że osiągnięcie projektowe nie jest przypadkowym odchyleniem od jego specjalności, lecz wynika z wcześniejszego zaplecza kompetencyjnego w zakresie sprężarek i maszyn wirnikowych. W recenzji habilitacyjnej ma to znaczenie, bo pokazuje ciągłość rozwoju naukowego: od analizy lokalnych stanów naprężenia do prób przeprojektowania funkcji całego zespołu.

Natomiast naukowa krytyka tego osiągnięcia jest również konieczna i w mojej ocenie powinna być wyraźna. Najważniejszy problem polega na tym, że z przedstawionych materiałów wynika przede wszystkim siła koncepcyjna i architektoniczna projektu, ale znacznie słabiej udokumentowano jego pełną walidację eksperymentalną. Opis wskazuje funkcje układu, spodziewane korzyści i potencjalne zastosowania, lecz nie przedstawia w sposób równie rozwinięty wyników stanowiskowych potwierdzających sprawność elektromagnetyczną, poziomą mocy, sprawność konwersji, wpływ dodatkowych magnesów i uzwojeń na bilans masy, temperaturę pracy, niezawodność w warunkach rzeczywistego środowiska silnika czy wpływ na aerodynamikę samej sprężarki. Zatem jako osiągnięcie

projektowe jest ono bardzo ciekawe, ale jako osiągnięcie stricte naukowe pozostawia jeszcze otwarte pytanie o stopień pełnej weryfikacji.

Drugi obszar krytyki dotyczy integracji wielofizycznej. W samym pomysłach zawiera się wiele potencjalnie trudnych do pogodzenia zjawisk: duża prędkość obrotowa, ograniczona przestrzeń montażowa, środowisko podwyższonej temperatury, wrażliwość magnesów i uzwojeń na temperaturę oraz drgania, możliwy wpływ dodatkowych elementów elektromagnetycznych na stateczność mechaniczną i dynamiczną układu wirnikowego, a także problem ekranowania, chłodzenia i niezawodności. W dokumentacji projektu nie widać równie rozwiniętego opisu takich zagadnień jak analiza cieplna układu elektromagnetycznego, wpływ integracji turboalternatora na pola naprężeń w bębnie sprężarki, wpływ na wyważenie wirnika czy bilans bezpieczeństwa w przypadku awarii. To nie przekreśla osiągnięcia, ale ogranicza możliwość bardzo wysokiej oceny stricte naukowej, bo część najtrudniejszych pytań pozostaje jeszcze na etapie koncepcji albo dalszego rozwoju.

Trzeci punkt krytyczny ma charakter metodologiczny. Projekt bardzo mocno akcentuje korzyści: redukcję systemów pobocznych, wzrost efektywności, zmniejszenie zużycia paliwa, emisji toksycznych składników spalin i poprawę wskaźników ekonomicznych. Są to kierunki wiarygodne i logiczne, ale w materiale przedstawionym do oceny widzę raczej dobrze uargumentowaną hipotezę projektową niż kompletny, szeroko zwalidowany zestaw dowodów liczbowych pozwalających bez zastrzeżeń oszacować skalę tych efektów. Wysoko można więc ocenić oryginalność i potencjał rozwiązania, ale ostrożniej należy mówić o stopniu jego empirycznego potwierdzenia.

Nasuający się wniosek jest zatem taki: jest to oryginalne osiągnięcie projektowe ma dużą wartość koncepcyjną, architektoniczną i prognostyczną, dobrze wpisuje się w światowy kierunek elektryfikacji i hybrydyzacji lotniczych zespołów napędowych i pokazuje samodzielność twórczą Habilitanta, ale równocześnie jest to osiągnięcie, które należy oceniać przede wszystkim jako oryginalny projekt konstrukcyjno-technologiczny o wysokim potencjale naukowym i wdrożeniowym, a nie jeszcze jako w pełni zamkniętą i wielostronnie zwalidowaną technologię. W recenzji stwierdzam więc, że jego główną siłą jest odwaga i oryginalność myślenia systemowego, a jego głównym ograniczeniem — niedostatecznie szeroko udokumentowana walidacja eksperymentalna oraz brak pełnego domknięcia najtrudniejszych zagadnień wielofizycznych.

Analizując całość przedstawionego materiału, obejmującego obszerną monografię naukową, spójny i logicznie rozwijany cykl dziewięciu publikacji powiązanych wspólną osią problemową oraz oryginalne osiągnięcie projektowe o charakterze konstrukcyjnym i technologicznym, stwierdzam z pełnym przekonaniem, że dr inż. Arkadiusz Stefan Bednarz wykazał się wysoką dojrzałością naukową, bardzo dobrą umiejętnością identyfikowania rzeczywistych problemów badawczych współczesnej inżynierii lotniczej oraz nieczęsto spotykaną zdolnością łączenia pogłębionej analizy teoretycznej z warsztatem numerycznym, eksperymentalnym i konstrukcyjnym. Oceniane osiągnięcia tworzą wyraźnie rozpoznawalny, konsekwentnie rozwijany program badawczy skoncentrowany na wytrzymałości zmęczeniowej elementów sprężarkowych silników lotniczych, wpływie warunków pracy, geometrii i technologii wykonania na ich trwałość oraz na możliwościach nowoczesnej modernizacji układów napędowych. Prace te są spójne merytorycznie, oparte na poprawnych podstawach metodologicznych, dobrze osadzone w aktualnym stanie wiedzy światowej i prowadzą do wyników mających zarówno znaczenie poznawcze, jak i aplikacyjne. W szczególności należy podkreślić, że Habilitant nie ograniczył się do opisu znanych zjawisk, lecz w wielu miejscach doprecyzował ich mechanizm, nadał im postać ilościowo obliczalną i powiązał z realnym problemem bezpieczeństwa oraz niezawodności lotniczych maszyn wirnikowych. Tym samym oceniany dorobek stanowi wartościowy, udokumentowany i w mojej ocenie **znaczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna**.

3. Ocena istotnej aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej

Działalność naukowo-badawcza, dydaktyczna oraz organizacyjna dr inż. Arkadiusza Stefana Bednarza, realizowana na Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, wykazuje wyraźną spójność tematyczną i konsekwentny rozwój w obszarze inżynierii mechanicznej, ze szczególnym uwzględnieniem wytrzymałości zmęczeniowej elementów lotniczych, modelowania obciążeń aerodynamicznych, naprężeń szczątkowych, technologii przyrostowych oraz zagadnień konstrukcyjnych związanych z maszynami wirnikowymi. Jednocześnie na podstawie przedłożonej dokumentacji należy stwierdzić, że aktywność ta nie była ograniczona do jednej jednostki macierzystej, lecz była rozwijana w wielu ośrodkach akademickich, badawczych i przemysłowych, zarówno w kraju, jak i za granicą. Taka skala i różnorodność współpracy **spełnia** ustawowe kryterium istotnej aktywności naukowej prowadzonej w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej.

W wymiarze międzynarodowym szczególnie istotne znaczenie miała aktywność Kandydata związana z **Lehigh University w Bethlehem w stanie Pensylwania**. W ramach stypendium **Fulbright Junior Research Award** dr inż. Arkadiusz Bednarz przebywał tam przez ponad sześć miesięcy, od sierpnia 2018 roku do marca 2019 roku. Początkowo prowadził badania nad modelowaniem obciążeń aerodynamicznych i trwałością zmęczeniową, a następnie rozszerzył ich zakres o zagadnienia materiałowe, zwłaszcza naprężenia szczątkowe i uplastycznienie wywołane kulowaniem. Efektem tej współpracy były wspólne publikacje z prof. Wojciechem Misiotkiem, odpowiadające jednemu z najmocniejszych bloków całego osiągnięcia habilitacyjnego, to jest pracom dotyczącym *shot-peening* oraz wpływu naprężeń szczątkowych na trwałość łopatk. Po zakończeniu pobytu współpraca nie wygasła, ponieważ Kandydat kontynuował badania także z prof. Justinem Jaworskim w obszarze wpływu modelowania obciążeń aerodynamicznych na stan naprężeń sprężarki odśrodkowej. Jest to przykład rzeczywistego, trwałego zakorzenienia aktywności naukowej w zagranicznym ośrodku akademickim, a nie wyłącznie jednorazowego wyjazdu stażowego.

Drugim ważnym kierunkiem aktywności międzynarodowej była **Sudwestfalen Fachhochschule w Soest w Niemczech**. W kwietniu 2022 roku Kandydat odbył tam tygodniowy staż w ramach programu Erasmus+. Pomimo formalnie dydaktycznego charakteru pobytu udało się nawiązać współpracę naukową związaną z materiałowymi badaniami zmęczeniowymi oraz problematyką druku 3D i zastosowania technologii przyrostowych w silnikach lotniczych. Z dokumentacji wynika, że współpraca ta miała już wymierny efekt w postaci wspólnego opracowania z prof. Alfonsem Noe, zaprezentowanego na konferencji SolMech 2024 we Wrocławiu. Istotne jest tu to, że pobyt zagraniczny przełożył się na rozwój nowego obszaru badań Kandydata, a więc modelowania ortotropowego i zastosowań druku 3D w konstrukcjach lotniczych.

Kolejnym zagranicznym partnerem badawczym był **University of São Paulo**. Współpraca z prof. Marcelo Alvesem rozpoczęła się w lutym 2023 roku, a następnie została pogłębiona podczas wyjazdu dydaktycznego w ramach programu **Erasmus+** pozaeuropejskiego, zrealizowanego w marcu 2024 roku. Celem wyjazdu było zarówno nawiązanie współpracy naukowej, jak i wymiana doświadczeń z Wydziałem Mechanicznym tej uczelni. Kandydat przeprowadził tam serię wykładów dla studentów i pracowników, prezentując swoje badania z zakresu konstrukcji i warunków pracy samolotów oraz silników lotniczych, badań zmęczeniowych łopatek w zakresie rezonansu i uszkodzeń mechanicznych, a także innych tematów realizowanych w katedrze. Efektem pobytu było nawiązanie współpracy w zakresie druku 3D i modelowania materiału jako ortotropowego, z uwzględnieniem kryteriów zniszczenia adaptowanych do technologii addytywnych. Z punktu widzenia recenzji habilitacyjnej jest

to przykład aktywności zagranicznej, która ma charakter zarówno dydaktyczny, jak i stricte naukowy, a ponadto bezpośrednio zasila tematykę osiągnięcia habilitacyjnego.

Należy również odnotować wcześniejszą współpracę z **Sankt Petersburg State University**, zapoczątkowaną podczas Letniej Szkoły Mechaniki Pękania w Bezmiechowej w 2015 roku. Współpraca ta zaowocowała siedmioma publikacjami opublikowanymi w latach 2015–2017, dotyczącymi wytrzymałości sprężarek osiowych, modelowania obciążeń i odporności powłok ceramicznych na erozję i zmęczenie. Z dokumentacji wynika, że były to prace ściśle powiązane z ówczasnie realizowaną rozprawą doktorską Kandydata. Choć część tej aktywności poprzedza uzyskanie stopnia doktora, to jednak stanowi ważne świadectwo jego wczesnej zdolności do podejmowania współpracy międzynarodowej i budowania zagranicznych kontaktów naukowych.

Międzynarodowy wymiar aktywności Kandydata nie ogranicza się wyłącznie do pobytów i współautorstwa publikacji. Z dokumentów wynika również, że od 2021 roku dr inż. Arkadiusz Bednarz uczestniczy w procesie recenzowania wniosków programu **Fulbright**, opiniując projekty składane w ramach Fulbright Student Award, Junior Research Award, STEM Impact Award oraz Senior Award. Tego rodzaju działalność ekspercka świadczy o uznaniu jego kompetencji przez renomowaną instytucję międzynarodowej wymiany akademickiej i potwierdza, że Kandydat funkcjonuje nie tylko jako autor publikacji, lecz także jako rozpoznawalny ekspert środowiska naukowego.

W wymiarze krajowym szczególnie wyraźna jest współpraca z **Politechniką Łódzką**. Kandydat od kilku lat współpracuje z dr. inż. Kirillem Kabalykiem w obszarze badań sprężarek promieniowych stosowanych w napędach lotniczych i przemysłowych. Współpraca ta obejmowała zarówno analizy CFD, jak i badania eksperymentalne parametrów pracy wirników oraz ocenę zachowania maszyn w stanach granicznych, takich jak *surge*. Jej efektem były co najmniej dwie wspólne publikacje, w tym jedna stanowiąca część głównego cyklu habilitacyjnego, a druga opublikowana w Scientific Reports w 2025 roku, dotycząca współczynnika bezpieczeństwa zmęczeniowego wirnika sprężarki odśrodkowej w zależności od grubości łopatki. Jest to wartościowa, merytoryczna współpraca z innym krajowym ośrodkiem akademickim, wykraczająca poza sporadyczny kontakt i mająca wymierny rezultat publikacyjny.

Bardzo istotna jest również współpraca z **Wojskową Akademią Techniczną, Instytutem Technicznym Wojsk Lotniczych** oraz **Instytutem Lotnictwa w Warszawie**. Z dokumentacji wynika, że efektem tej współpracy były trzy publikacje naukowe, w tym artykuł dotyczący numerycznej analizy wpływu obciążeń aerodynamicznych na częstotliwości rezonansowe łopatki sprężarki silnika PZL-10W. Współpraca obejmowała obliczenia analityczne, modelowanie CFD, analizę FSI i ocenę skutków zmian prędkości obrotowej oraz obciążeń aerodynamicznych dla postaci drgań własnych. Co istotne, dokument współautorski złożony przez przedstawiciela Wojskowej Akademii Technicznej wskazuje, że dr inż. Arkadiusz Bednarz odpowiadał w tej pracy za stworzenie hipotezy, koncepcję badań, wykonanie obliczeń, analizę wyników, przygotowanie manuskryptu i prowadzenie procesu recenzyjnego. Jest to zatem aktywność realna, dobrze udokumentowana i wyraźnie naukowa.

Na podstawie przedstawionych materiałów należy też zauważyć współpracę z sektorem przemysłowym, która w przypadku Kandydata ma wyraźny komponent badawczy i rozwojowy. W dokumentacji wymieniono współpracę z **Pratt & Whitney Rzeszów**, obejmującą udział w cyklicznych spotkaniach dotyczących stanowiska badawczego H2 Fuel Nozzle Rig, z udziałem partnerów z Polski, Kanady i Stanów Zjednoczonych. Materiał ten potwierdza udział Kandydata w pracach na styku uczelni i przemysłu lotniczego. Ponadto w autoreferacie i załącznikach wykazano doświadczenie zawodowe w **Boeing Poland** oraz **Safran Aircraft Engines Poland**, gdzie Kandydat pracował odpowiednio jako analityk naprężeń oraz starszy inżynier analiz mechanicznych. Nie jest to w ścisłym sensie aktywność

uczelniana, ale z punktu widzenia rozwoju badawczego ma duże znaczenie, ponieważ pozwala na transfer metod numerycznych i kompetencji projektowych pomiędzy środowiskiem akademickim a wysokotechnologicznym przemysłem lotniczym.

Ważnym uzupełnieniem aktywności naukowej i eksperckiej Kandydata jest udział w pracach **Partnerstwa Wodorowego przy Ministerstwie Klimatu i Środowiska**. Z dokumentów wynika, że uczestniczył w pracach grup roboczych oraz był włączony w działania związane z przygotowaniem Polskiego Porozumienia Wodorowego. Dodatkowo pełni funkcję eksperta wpisanego do wykazu ekspertów programu Fundusze Europejskie dla Podkarpacia 2021–2027, z umocowaniem do oceny projektów w kilku departamentach regionalnego programu operacyjnego. Tego rodzaju zaangażowanie potwierdza, że jego kompetencje naukowe są wykorzystywane także poza macierzystą jednostką, w systemie eksperckim i ewaluacyjnym.

Na tle całej dokumentacji wyraźnie widać, że aktywność dr inż. Arkadiusza Bednarza ma charakter nie tylko publikacyjny, ale również sieciujący i środowiskotwórczy. Obejmuje ona współpracę z uczelniami zagranicznymi w Stanach Zjednoczonych, Niemczech, Brazylii i wcześniej w Rosji, współpracę z uczelniami i instytucjami krajowymi, współpracę z przemysłem lotniczym oraz działalność ekspercką w strukturach programowych i grantowych. Dodatkowo dokumenty potwierdzają, że zakres tej aktywności był związany z jego główną specjalnością badawczą, a więc nie miał charakteru przypadkowego ani pobocznego. Przeciwnie, prowadził do kolejnych publikacji, projektów, konferencji, prezentacji i kontaktów badawczych rozwijających zasadniczą oś jego pracy naukowej.

W podsumowaniu stwierdzam jednoznacznie, że dr inż. Arkadiusz Stefan Bednarz **wykazał się** istotną i wartościową aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni oraz instytucji naukowej, w tym w szczególności zagranicznej. Aktywność ta ma charakter udokumentowany, wieloletni, merytorycznie spójny z profilem badawczym Kandydata i prowadzi do wymiernych rezultatów naukowych. Tym samym należy uznać, że **spełnia** on także trzeci warunek ustawy stawiany kandydatowi do stopnia doktora habilitowanego.

4. Wniosek końcowy

Dr inż. Arkadiusz Stefan Bednarz jest badaczem o wyraźnie ukształtowanym profilu naukowym, którego działalność koncentruje się wokół ważnych i aktualnych problemów współczesnej inżynierii mechanicznej, zwłaszcza w obszarze wytrzymałości zmęczeniowej komponentów lotniczych, modelowania obciążeń aerodynamicznych, wpływu technologii wykonania na trwałość elementów wirnikowych oraz zastosowania nowoczesnych metod numerycznych i materiałowych w analizie maszyn przepływowych. Jego dorobek ma charakter spójny, tematycznie konsekwentny i dobrze osadzony zarówno w podstawach mechaniki, jak i w rzeczywistych problemach konstrukcyjnych oraz eksploatacyjnych silników lotniczych. Istotne jest przy tym, że po uzyskaniu stopnia doktora w 2019. roku rozwija on własny, rozpoznawalny program badawczy jako adiunkt Politechniki Rzeszowskiej.

Za najważniejszy element dorobku Habilitanta uznaję osiągnięcie naukowe przedstawione w postaci autorskiej monografii, cyklu dziewięciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych oraz oryginalnego osiągnięcia projektowego. Osiągnięcie to dotyczy oceny wpływu warunków pracy, geometrii i technologii wykonania na wytrzymałość zmęczeniową sprężarki z silnika lotniczego i w mojej ocenie stanowi dojrzały, merytorycznie przekonujący oraz dobrze udokumentowany wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna. Na szczególne podkreślenie zasługuje połączenie analiz materiałowych, badań nad wpływem temperatury, rezonansu, uszkodzeń typu FOD, naprężeń szczątkowych po kulowaniu oraz zagadnień związanych z technologiami przyrostowymi. Dodatkową

wartość stanowi opracowanie projektu „**Turboalternator lotniczy zintegrowany z bębniem/wałem i statorem sprężarki**”, który uzyskał wsparcie przedwdrożeniowe w programie Inkubator Innowacyjności 4.0, co potwierdza także aplikacyjny potencjał działalności Kandydata.

Wysoko oceniam także aktywność naukową Habilitanta realizowaną poza jednostką macierzystą. Obejmuje ona współpracę z zagranicznymi ośrodkami akademickimi, w tym z Lehigh University, Sudwestfalen Fachhochschule oraz University of São Paulo, a także udział w międzynarodowych programach i działaniach eksperckich związanych z Fulbrightem. Równolegle Kandydat rozwijał współpracę z partnerami przemysłowymi i instytucjonalnymi, czego przejawem są m.in. kontakty z Pratt & Whitney Rzeszów, doświadczenie zawodowe zdobyte w Boeing Poland i Safran Aircraft Engines Poland, udział w Partnerstwie Wodorowym koordynowanym przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska oraz funkcja eksperta programu Fundusze Europejskie dla Podkarpacia. Ten szeroki zakres aktywności świadczy o zdolności do łączenia badań podstawowych, prac stosowanych, współpracy międzynarodowej i działalności eksperckiej.

Biorąc pod uwagę moje **pozytywne odpowiedzi na trzy warunki** stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego, stwierdzam, że dr inż. Arkadiusz Stefan Bednarz spełnia kryteria określone w art. 219 ustawy z dnia dwudziestego lipca dwa tysiące osiemnastego roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce dla postępowania habilitacyjnego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Jego dorobek naukowy, osiągnięcie habilitacyjne oraz aktywność międzyośrodkowa stanowią wartościowy, udokumentowany i istotny wkład w rozwój tej dyscypliny. W związku z tym **opiniuję wniosek dr inż. Arkadiusza Stefana Bednarza pozytywnie i popieram nadanie mu stopnia doktora habilitowanego.**

Mirosław Wendeker