

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak
Politechnika Koszalińska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michała Karoluka

KSZTAŁTOWANIE WŁASNOŚCI ZMĘCZENIOWYCH DWUFAZOWYCH STOPÓW TYTANU WYTWARZANYCH TECHNOLOGIĄ PRZYROSTOWĄ POWDER BED FUSION ELEKTRON BEAM

Promotor: prof. dr hab. inż. Edward Chlebus
Promotor pomocniczy: dr inż. Robert Dziedzic

Koszalin, wrzesień 2026

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michała Karoluka

KSZTAŁTOWANIE WŁASNOŚCI ZMĘCZENIOWYCH DWUFAZOWYCH STOPÓW TYTANU WYTWARZANYCH TECHNOLOGIĄ PRZYROSTOWĄ POWDER BED FUSION ELECTRON BEAM

Promotor: prof. dr hab. inż. Edward Chlebus

Promotor pomocniczy: dr inż. Robert Dziedzic

1. Ocena tematu, koncepcji oraz zakresu pracy

Celem doktoranta, ujętym w ocenianej rozprawie doktorskiej, było opracowanie podstaw optymalizacji parametrów addytywnego wytwarzania dwufazowych stopów tytanu na łożu proszkowym z użyciem wiązki elektronów. Istotne było również wyznaczenie optymalnych parametrów obróbki poprocesowej, w celu poprawy wytrzymałości zmęczeniowej wytwarzanych elementów.

W planie pracy poprawnie ujęto relacje między kolejnymi zadaniami. Zdefiniowano wielkości wejściowe i wyjściowe do poszczególnych problemów badawczych.

Ukierunkowanie pracy doktorskiej na doskonalenie technologii przyrostowych elementów ze stopu tytanu Ti-6Al-4V (Ti-64) w aspekcie podwyższania wytrzymałości zmęczeniowej, jest uzasadnione zastosowaniami tych stopów, między innymi w konstrukcjach lotniczych. W procesach przyrostowych kształtowane są cechy elementów, które są skutkiem sekwencyjnego tworzenia struktury oraz lokalnego oddziaływania strumienia energii.

Powoduje to, że liczba parametrów mających wpływ na cechy wytwarzanego elementu znacznie się powiększa, wpływ wielu parametrów jest nieliniowy, a nawet zmienność tego wpływu może być znaczna. Do tego dochodzi zróżnicowanie cech wynikające z mechanizmów kumulacji skutków losowych czynników wpływających na powtarzalność procesów.

Badania zmęczeniowe, związane z narastaniem lokalnych zjawisk zmian struktury i inicjacji destrukcji, zależnych od ukształtowania elementów oraz propagacji zmian w strefach o złożonej topografii, charakteryzują się znacznym rozproszeniem wyników. W konstruk-

cjach, od których wymaga się najwyższej niezawodności, ważne są nie wartości parametrów dotyczące średniej trwałości, lecz parametry określające trwałość do momentu wymiany uprzedzającej, czyli trwałość odpowiadającą bardzo niskiej dopuszczalnej wartości ryzyka.

Autor słusznie nawiązuje do wymagań dotyczących certyfikacji, bo z jednej strony nowa wiedza pozwala poprawnie kształtować wymagania certyfikacyjne, a z drugiej strony ukazuje, że sumaryczny dorobek wielu badaczy i producentów ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa wytwarzanych produktów.

Praca doktorska reprezentuje dyscyplinę inżynieria mechaniczna, gdyż tworzy podstawy procesów wytwarzania elementów z dwufazowych stopów tytanu na łożu proszkowym z użyciem wiązki elektronów oraz zawiera wyniki dodatkowych procedur korzystnie wpływających na wytrzymałość zmęczeniową tych elementów.

Znaczenie naukowe i cywilizacyjne wyników ocenianej pracy jest znaczne. Rozpatrywane w pracy procesy wytwarzania przyrostowego w próżni, należą do bardzo skomplikowanych metod wytwarzania. Praca tworzy ważny wkład do wiedzy o tych procesach i jest ważnym elementem podwyższania bezpieczeństwa w warunkach użytkowania zaawansowanych układów poddawanych obciążeniom zmęczeniowym, w tym w zaawansowanych konstrukcjach lotniczych.

Rozprawa jest kompletna, zawiera poprawne podsumowanie stanu wiedzy i jasne przedstawienie osiągnięć Autora. Praca charakteryzuje się bardzo dobrym poziomem, dobrze opracowaną metodyką, wykorzystaniem zaawansowanych stanowisk badawczych, bardzo dobrze zaprezentowanymi wynikami badań oraz przykładami wykorzystania efektów badań.

2. Ocena poziomu naukowego i osiągnięć rozprawy

Do najważniejszych osiągnięć naukowych ocenianej pracy doktorskiej zaliczam:

- Staranną analizę składu chemicznego, rozkładu wielkości cząstek oraz wielu cech, od których zależą wyniki procesu addytywnego wytwarzania elementów z dwufazowych stopów tytanu na łożu proszkowym z użyciem wiązki elektronów. W doborze warunków i parametrów procesu wytwarzania Autor wykazał, że uzależnianie zalecanych parametrów procesu od wyników minimalizacji porowatości, jest nadmiernie uproszczonym postępowaniem. Pomijane byłyby wówczas inne ważne kryteria jakości, takie jak stabilność procesu oraz dokładność wytwarzanych elementów.
- Autor na podstawie wnikliwych badań porowatości, mikrostruktury, składu fazowego, twardości, wytrzymałości i topografii przełomów oraz badań zmęczeniowych, wykazał ponadto, że korzystne właściwości wytrzymałości w warunkach statycznych oraz niska porowatość nie są wystarczające do prognozowania wytrzymałości w warunkach obciążeń cyklicznych.

- Ważnym osiągnięciem jest wyznaczenie czynników o największym wpływie, którymi były lokalne defekty technologiczne, zwłaszcza płaskie nieciągłości w postaci bardzo cienkich szczelin, będących skutkiem słabego połączenia sąsiadujących warstw. Strefy te, jak potwierdzono w badaniach, stanowiły miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych.
- **W rozwinięciu problemów odnoszących się do poprzedniego osiągnięcia, pozostaje moim zdaniem do realizacji w przyszłości**, jeszcze wiele zadań naukowych dotyczących definiowania i digitalizacji oceny wielkości, liczności i rozmieszczenia tych wad, ich zależności od lokalnej objętości materiału, liczby warstw, jednorodności warstw, płaskości, a także charakterystyk stref zewnętrznych przedmiotu. Ponadto kolejny zbiór zadań może obejmować metody ograniczania i prognozowania występowania defektów technologicznych oraz parametry statystyczne ich cech. Następny zbiór zadań może obejmować zależności wytrzymałości zmęczeniowej od parametrów defektów technologicznych.
- **Technologie przyrostowe, w porównaniu ze znanymi i w znacznym stopniu już poznanymi metodami kształtowania elementów konstrukcyjnych, charakteryzują się wielokrotnie większym zbiorem parametrów decyzyjnych. Większy jest też stopień złożoności technologicznej.** To przekłada się na problemy wynikające z proporcji wymaganego bardzo dużego nakładu pracy, w postaci sumy zadań badawczych, niezbędnych do zapewnienia oczekiwanej „głębokości poznania”. Wraz ze zwiększaniem liczby istotnych parametrów, nakład pracy rośnie szybciej niż n , można przyjąć, że co najmniej potęgowo z wykładnikiem większym od 1. **Pamiętać przy tym trzeba, że technologie przyrostowe są jeszcze w fazie początkowej swojego rozwoju. Z tego wynika, że osiągnięcia zawarte w dysertacji są istotnym wkładem w rozwój wiedzy i zastosowań tych technologii.**
- Analiza wyników różnych wariantów obróbki poprocesowej w zakresie jej wpływu na mikrostrukturę, własności mechaniczne i mechanizm inicjacji pęknięć, pozwoliła ocenić możliwości ograniczenia wpływu krytycznych nieciągłości na wytrzymałość zmęczeniową.
- Zrealizowany starannie program badań doprowadził do opracowania podstaw doboru parametrów technologicznych procesu, które zapewniły wzrost wytrzymałości zmęczeniowej stopów tytanu Ti-6Al-4V (Ti-64) oraz Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe (Ti-55511) odpowiednio o 120% i 50%.

Struktury ukształtowane w procesie addytywnego wytwarzania elementów konstrukcyjnych z dwufazowych stopów tytanu na łożu proszkowym z użyciem wiązki elektronów mają wiele cech odrębnych w porównaniu z konwencjonalnymi metodami wytwarzania. Występują w nich różnorodne typy nieciągłości materiałnych oraz lokalne zróżnicowanie jednorodności nie tylko materiałowych, ale również własności fizycznych i chemicznych.

Powoduje to, że uzasadnione jest stwierdzenie, że w takich strukturach liczby stref зароdkowania są znacznie liczniejsze w porównaniu z materiałami litymi. Z tego wynika, że

mechanizmy narastania uszkodzeń i ich propagacji są kumulacją dużej liczby randomizowanych różnie ukierunkowanych trajektorii, które tworzą złożoną przestrzenną sieć. Zjawiska te ponadto są zależne od cech struktury danego stopu.

W tej sieci przestrzennych trajektorii propagacji może następować kaskadowa kumulacja różnokierunkowych powierzchniowych destrukcji. To powoduje, że proces ten jest znacznie bardziej złożony od typowych mechanizmów addytywnego, lecz jednokierunkowo przyrostowego procesu zmęczeniowego w elementach wytwarzanych z materiałów o wysokiej spójności, wytworzonej w procesach ich produkcji, na przykład z zastosowaniem obróbki plastycznej.

Nawet jeżeli przyjmiemy, że typowe procesy narastania mikropęknięć materiału w materiałach litych też mogą być odwzorowaniem lokalnych i przestrzennych zmienności cech materiału, to jednak w elementach wytwarzanych przyrostowo stopień lokalnego zróżnicowania jednorodności oraz spójności jest o wiele poziomów wyższy.

Z powyższego wynika wysoka wartość ocenianej pracy. Autor podjął się trudnego zadania badawczego i jak odczytuję to z potwierdzonych hipotez oraz wniosków, miał świadomość, że buduje pewien zbiór wyników i tworzy w ten sposób podstawy, które posłużą do ulepszenia założeń do modelowania procesów destrukcji zmęczeniowej.

Cenne jest również to, że w rozprawie doktorskiej zostały przedstawione metody ograniczania wpływu krytycznych nieciągłości na wytrzymałość zmęczeniową. **Towarzyszy temu świadomość, że procesy ulepszania technologii są podstawą lepszych wytworów, a procesy pełniejszego poznania mechanizmów, są z kolei podstawą ukierunkowania metod obróbki poprocesowej.** Autor słusznie podkreśla, że wytworzenie podczas dodatkowej obróbki naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej jest korzystne z uwagi na wytrzymałość zmęczeniową. Korzystne jest również zastosowanie specjalnych technik obróbki cieplnej ukierunkowanych na zmniejszanie porowatości.

Autor przeprowadził kompleksowe badania dotyczące minimalnej energii zapłonu, składu chemicznego, morfologii proszku, rozkładu frakcji, gęstości nasypowej, porowatości, wpływu kierunku wytwarzania na porowatość stopu, wpływu umiejscowienia próbek na platformie procesowej na porowatość oraz badania porowatości po obróbce poprocesowej. Przeprowadził następnie statyczne próby rozciągania, analizy mikrostruktury, składu fazowego oraz badania zmęczeniowe.

Program badań zapewnił komplementarność danych i pozwolił na formułowanie relacji między cechami struktury i wpływem obróbki poprocesowej na wytrzymałość zmęczeniową. Autor na podstawie oceny wielu eksperymentów wykazał, że dobór wariantu obróbki poprocesowej powinien uwzględniać zdefiniowany kompromis między obniżeniem właściwości statycznych, a poprawą właściwości zmęczeniowych.

W pacy zawarto wniosek: "Rozkład porowatości i procentowy udział porów w próbkach wytworzonych z Ti-64 przedstawiono na rysunku 32. Można zauważyć, że największa porowatość występuje w próbkach o nr 60 i 120, które znajdują się w prawym górnym narożniku platformy 2 i 3; ich porowatość wynosi odpowiednio: 0,411% i 0,511%. Koryguję oznaczenie próbek: Powinno być ... w próbkach o nr 64 i 120..."

Powyższy wniosek wskazuje na konstrukcyjne cechy układu technologicznego, w którym, skanowanie wiązką elektronów wynika z kształtu elementu zapisanego w pliku CAD, lecz trajektorie wiązki mają postać wierszową, a elementy 64 i 120 były zapewne końcowym fragmentem trajektorii. **Dodam, choć ta uwaga jest poza zakresem ocenianej pracy, że w dalszych pracach warto analizować problem optymalizacji trajektorii wiązki elektronów dla określonych kształtów elementów.** Można rozważać różne układy od pseudo-spiralnych po krzyżowe oraz radialne. Wprawdzie wiąże się to z konstrukcją urządzeń technologicznych, ale może być inspiracją do innowacji w tym zakresie.

Zasadne jest również rozważanie jaki byłby wpływ wymiarów próbek użytych do badań wytrzymałości na rozciąganie (próbki miały wymiar przewężenia 4 mm), a także próbek do badań wytrzymałości zmęczeniowej (wymiar przewężenia wynosił 5 mm), na wyniki badań. Uwzględniając zakres wymiarów cząstek o kulistym kształcie od ok. 50 do 100 mikrometrów, można ocenić, że w najmniejszym przekroju jest odpowiednio od 10000 do 2500 cząstek. To znaczna różnica w stosunku do obserwowanego rozproszenia wyników badań. Autor słusznie wskazał na wpływ chropowatości powierzchni na inicjowanie i propagację lokalnych zmian prowadzących do mikropęknięć.

Badania przeprowadzono zgodnie z normą Amerykańskiego Stowarzyszenia Badań i Materiałów ASTM E466. Normy są znacznie uproszczonym uogólnieniem wiedzy ukierunkowanym na standaryzację i porównywanie wyników badań. Zostały sformułowane po pewnym czasie, często długim okresie zbierania danych. Zapewne użyteczne byłoby porównanie wyników dla różnych wymiarów próbek, nawet innych niż standaryzowane. Uzasadnienie wynika z faktu, że rzeczywiste procesy wytwarzania i kształtowania cech elementów w znacznym stopniu zależą od wielkości i ukształtowania elementów.

Uwagi powyższe nie pomniejszają pozytywnej oceny wartości nowej wiedzy, jaka wynika z ocenianej pracy doktorskiej. **Wskazują jedynie, że nowe technologie wytwarzania przyrostowego, wskutek ich złożoności, a także ze względu na coraz większy potencjał aplikacyjny, są bardzo ważnym i przyszłościowym kierunkiem rozwoju mikro-inżynierii oraz zaawansowanych zastosowań technicznych i biomedycznych.**

3. Wniosek końcowy

W wyniku analizy rozprawy mgr inż. Michała Karoluka nt.: Kształtowanie własności zmęczeniowych dwufazowych stopów tytanu wytwarzanych technologią przyrostową Powder Bed Fusion Electron Beam, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Edward Chlebus, mogę stwierdzić, iż Autor:

- Przedstawił pracę doktorską, która reprezentuje dyscyplinę inżynieria mechaniczna i tworzy podstawy procesów addytywnego wytwarzania elementów konstrukcyjnych z dwufazowych stopów tytanu na łożu proszkowym z użyciem wiązki elektronów.
- Przeprowadził bardzo obszerną i wnikliwą analizę literatury oraz właściwie określił cele pracy. Wybrał temat i zakres pracy doktorskiej bardzo ważny dla rozwoju wiedzy i zastosowań metod addytywnego wytwarzania dwufazowych stopów tytanu na łożu proszkowym z użyciem wiązki elektronów
- Opracował i zastosował metodykę pracy naukowej, w której wykorzystał wiele zaawansowanych metod badania właściwości elementów wytwarzanych przyrostowo z dwufazowych stopów tytanu. Zastosował procedury badawcze i przeprowadził analizy właściwości wytwarzanych elementów z zastosowaniem kompleksowej metodyki badań naukowych.
- Przyjął szeroki zakres problemów rozpatrywanych w rozprawie. Przeprowadził wiele szczegółowych rozważań i uzyskał cenne osiągnięcia poznawcze oraz aplikacyjne. To tworzy podstawy projektowania procesów addytywnego wytwarzania elementów z dwufazowych stopów tytanu na łożu proszkowym z użyciem wiązki elektronów, uzupełnianych o obróbkę poprocesową.
- Na wysoką ocenę zasługuje to, że oceniana praca doktorska może być podstawą do dalszych badań nad procesami wytwarzania przyrostowego elementów ze stopów tytanu o cechach dedykowanych do różnorodnych zastosowań.

Stwierdzenia powyższe uzasadniają opinię, iż rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określonym w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571). Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony. **Poziom naukowy pracy, staranność analiz oraz zakres badań i znaczenie aplikacyjne pracy składają się na ocenę wyróżniającą.**

