

płk dr hab. inż. Krzysztof Dragan, prof. ITWL

Warszawa, 04.10.2023 r.

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

ul. Ks. Bolesława 6

01-494 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Malickiego p.t. „Określenie stopnia uszkodzenia stopu Inconel 718 na podstawie analizy stanu powierzchni materiału”.

Podstawa:

Recenzja została opracowana na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna „ Wojskowej Akademii Technicznej - prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego - pismo z dnia 18 lipca 2023 r.

1. Ogólna i formalna charakterystyka pracy

W przedstawionej do oceny pracy autor przedstawił problematykę identyfikacji stanu techniczno - materiałowego stopu Inconel 718 w celu możliwości identyfikacji wczesnego etapu rozwoju uszkodzeń w szczególności na podstawie analizy powierzchni badanego elementu. Zagadnienie przedstawione w pracy dotyczy problematyki wczesnej identyfikacji możliwości powstania uszkodzenia w badanej konstrukcji. Praca w szczególności koncentruje się na identyfikacji obecności pęknięcia zmęczeniowego w trakcie eksploatacji konstrukcji. Problematyka przedstawiona w pracy dotyczy określenia i walidacji metody umożliwiającej szacowanie stopnia uszkodzenia z wykorzystaniem pomiaru twardości oraz profilometrii stykowej. Założenia pracy opierają się na wpływie uszkodzenia na mikro i makrostrukturalne własności materiałowe związane z dyslokacją występującą w sieci krystalicznej co finalnie wpływa na wytrzymałość struktury. Praca wpisuje się w nurt opracowań związanych z analizą metod umożliwiających ocenę struktury w sposób pozwalający na zachowanie ciągłości struktury - w szczególności w takim celu stosuje się badania nieniszczące. Badania takie w przypadku przedstawionej problematyki wymagają stosowania odpowiednich narzędzi pomiarowych i określają w zależności od metody - powierzchniowy stan struktury lub wolumetryczny stan struktury. W zaproponowanej pracy autor proponuje podejście dotyczące możliwości oceny stanu struktury wykorzystując unormowane metody analizy powierzchni.

Zastosowanie takich metod w szczególności dla eksploatowanych obiektów w fazie jeszcze przed powstaniem uszkodzenia ma istotne znaczenie z uwagi na wpływ istnienia mikro-defektów w procesie rozwoju uszkodzenia. Z uwagi za zmienne obciążenia cykliczne oraz możliwe wady materiałowe istniejący zapas bezpieczeństwa dla takiej konstrukcji nawet dla elementów o zbliżonym zastosowaniu lecz różnym profilu eksploatacji może być znacząco różny. Autor podejmując się tej tematyki zwrócił uwagę na mechanizmy propagacji uszkodzenia w oparciu o mechanikę pękania biorąc pod uwagę poszczególne cykle uszkodzenia od zarodkowania uszkodzenia aż do procesu wzrostu w oparciu o liniowo sprężystą i liniowo plastyczną mechanikę pękania. Podjęta tematyka wpisuje się w nurt prac o charakterze eksperymentalnym z uwzględnieniem możliwości zastosowania uzyskanych wyników do strukturalnej oceny elementów eksploatowanych w urządzeniach czy obiektach konstrukcyjnych.

Autor przedstawił swoje dokonanie na 182 stronach maszynopisu obejmując swoim zakresem następujące części:

- **Wstęp** w którym autor przybliży problematykę identyfikacji uszkodzeń w oparciu o zagadnienia mechaniki pękania. Autor dokonuje identyfikacji mechanizmów uszkadzania materiału pod wpływem istniejących uszkodzeń co prowadzi do defektowania materiału w mechanizmie mikro i makroskopowym. Autor szczegółowo omawia i charakteryzuje etapy powstawania uszkodzeń, przedstawia również powiązania związane z typem sieci krystalicznej a uszkodzeniami. W rozdziale przedstawiono również sposób powstawania uszkodzeń pod wpływem obciążeń dla złożonego stanu naprężeń. Autor opisuje mechanizmy plastycznego rozwoju uszkodzenia wraz z analizą czynników powodujących jego powstanie na przykładzie przedstawionych przełomów. W dalszej części rozdziału autor szczegółowo przedstawia i opisuje mechanizm indukcji uszkodzenia materiału dla obciążeń wysoko i niskocyklowych. Celem rozdziału jest wprowadzenie pojęć i zjawisk wykorzystywanych w dalszej części pracy do identyfikacji procesu uszkodzenia. W dalszej części dokonania autor przybliży własności fizykochemiczne i mechaniczne stopu poddanego dalszym rozważaniom w swojej pracy którym jest stop niklowo - chromowy Inconel 718. Materiał ten z uwagi na dobre własności odlewnicze i podatność spawalniczą jak również znaczną wytrzymałość w warunkach wysokich temperatur ma znaczące zastosowanie w konstrukcjach lotniczych czy kosmicznych. W dalszej części pracy autor przechodzi do opisu narzędzi za pomocą których w dalszych podrozdziałach przedstawia metodologię oceny stanu powierzchni. W rozdziale przedstawione jest podejście do opisu uszkodzenia jako wskaźnika o charakterze zmiennej zawartej w skończonym przedziale. Taki zdefiniowany i opisany wskaźnik uszkodzenia umożliwia skalowanie i porównywanie badanych elementów w ujęciu ilościowym pozwalając poprzez identyfikację zmian własności mechanicznych i fizycznych oceniać stan badanego elementu.

Autor w pracy posługuje się:

- mechanicznymi wskaźnikami uszkodzenia (np. twardość, zmiany amplitud odkształceń),
- fizycznymi wskaźnikami uszkodzenia (badania nieniszczące, badania dyfraktometryczne),
- metalograficznymi wskaźnikami uszkodzenia - pozwalającymi poprzez analizę „post-mortem” zglądów metalograficznych w celu np. określenia intensywności pasm poślizgu.

Finalnie autor definiuje model uszkodzenia wg Johnsona - Cooka’a który dzięki dyskretyzacji obliczeń pozwala na wzięcie pod uwagę przedstawionych w pracy czynników wpływających na rozwój uszkodzenia. Finalnie autor podsumowuje przedstawione założenia podkreślając, że w z uwagi na utrudnienia w określaniu wskaźników mechanicznych w praktyce istnieją pośrednie metody identyfikacji stanu uszkodzenia pozwalającego na odniesienie do modelu bezpośredniego.

- **Rozdział drugi** w którym autor przedstawia tezę pracy.

Teza pracy zawiera stwierdzenie, iż analiza stanu przypowierzchniowego i powierzchniowego badanego materiału przeprowadzona za pomocą zidentyfikowanych i przedstawionych w pracy metod badawczych pozwala na wczesne wykrycie uszkodzenia materiału w warunkach **eksploatacji konstrukcji**.

- **Rozdział trzeci** w którym przedstawione zostały metody analizy i oceny powierzchni zastosowane w pracy do weryfikacji postawionej tezy badawczej. Autor przedstawia metodologię pomiaru twardości wraz ze szczegółowym technicznym opisem przygotowania i realizacji badań. Autor syntetyzuje wiedzę w oparciu o teorię styku ciał przedstawiając podstawowe zależności opisowe dla procesu pomiaru. Przedstawiona metodologia prowadzi do przedstawienia parametrów wytrzymałościowych badanego elementu. Autor przedstawia zależności wiążące wyniki pomiaru z możliwymi do oceny parametrami wytrzymałościowymi ocenianego materiału i takimi jak: granica plastyczności poprzez interpretacje wartości uzyskanych z pomiaru wskutek zmian mikro-strukturalnych. W dalszej części rozdziału autor szczegółowo przedstawia metodologię pomiaru profilu powierzchni wiążąc ze sobą sposób realizacji pomiaru z interpretacją wyników z rzeczywistych obiektów poddanych procesom zmęczeniowym. Autor szczegółowo omawia warsztat pomiarowy w celu przedstawienia sposobu oceny zarejestrowanego sygnału. Przedstawiona metodologia obejmuje również podstawy analizy widmowej sygnału za pomocą filtrów pasmowych. W dalszej części rozdziału autor szczegółowo charakteryzuje metody pomiaru badań powierzchni na podstawie istniejących na rynku urządzeń pomiarowych. Autor przedstawia podstawowe charakterystyki opisowe chropowatości powierzchni oraz parametry kształtu jak również przedstawia podstawowe statystyce miary rozrzutu i oceny komparatywnej rejestrowanych danych w odniesieniu do profilu

powierzchni. W dalszej części autor bardzo szczegółowo omawia wyposażenie do badań twardości wraz z drobiazgowym opisem wykonanego stanowiska pomiarowego, profilometrii powierzchni oraz wyposażenia dodatkowego wykorzystanego do przeprowadzenia eksperymentu.

- **Rozdział czwarty** przedstawia program badań eksperymentalnych zrealizowany w ramach niniejszej pracy. Program badań obejmuje trzy podstawowe etapy. Etap pierwszy obejmuje badania stopu typu Inconel 718 scharakteryzowanego w niniejszej pracy. Wykonane badania objęły analizę chropowatości, składu strukturalnego materiału rodzimego jak również badania geometrii próbek do badań wytrzymałościowych. Etap drugi pracy objął wprowadzenie uszkodzeń do badanego elementu w celu wyznaczenia wartości odkształcenia plastycznego materiału. Wprowadzenie uszkodzenia wykonano poprzez próbę statycznego rozciągania. Wartości odkształcenia plastycznego oceniano poprzez pomiary geometrii próbki. Ostatni trzeci etap stanowił analizę obrazów fraktograficznych próbek poddanych badaniom wytrzymałościowym oraz badaniom chropowatości i twardości. W przedstawionym rozdziale autor szczegółowo charakteryzuje materiał poddany badaniom oraz wprowadza wskaźniki uszkodzenia na podstawie przyrostu uszkodzenia. W dalszej części przedstawione zostały parametry badania wraz z ich planowanym przebiegiem.
- **Rozdział piąty** stanowi punkt ciężkości naukowej pracy autora koncentrując w sobie zarejestrowane wyniki badań oraz ich analizę. Autor dokonał badania dwóch próbek wraz z różnicowaniem wartości maksymalnego cyklu obciążającego o 100 MPa. W pierwszej kolejności autor przedstawia wyniki badań mechanicznych przedstawionych próbek. Na podstawie pomiarów przekrojów poprzecznych próbek autor omawia wyniki związane z przyrostem wskaźnika uszkodzenia. W dalszej części pracy doktorant przedstawia wyniki faktograficzne próbek wraz z oceną przełomów umożliwiającą określanie tempa przyrostu uszkodzenia dla badań HCF i LCF. Na podstawie tych obrazów autor dokonuje analizy morfologii procesu prowadzącego do wnioskowania o szybkości przyrostu w zależności od zmian krystalograficznych (tj. liczby wtrąceń). Autor dokonuje też szczegółowej oceny powierzchni bocznych badanych elementów w celu zmian powierzchni spowodowanych odkształceniami i występowaniem pęknięć. W dalszej części autor prowadzi badania chropowatości prowadzące do konkluzji, iż te badania nie są odpowiednio dokładne żeby ocenić wpływ odkształcenia plastycznego na chropowatość powierzchni. Kolejnym elementem poddanym analizie jest ocena instrumentowanych wyników pomiaru twardości. Autor przedstawia szeregi zestawień wyników pomiarów twardości skorelowanych z pomiarami dyfrakcyjnymi oraz pomiarami wytrzymałościowymi. W każdym z podrozdziałów autor formułuje szczątkowe spostrzeżenia wynikowe. W ostatniej części autor przeprowadza wnioskowanie mające na celu wpływ oceny rozrzutu wartości rejestrowanych

parametrów z zakresami ich zmienności na możliwe zakresy błędu pomiarowego. Autor prezentuje poszczególne składowe niepewności pomiarowej z poszczególnych metod pomiaru wraz z dyskusją źródłowości tych niepewności.

- **Rozdział szósty** w którym autor przedstawia krótkie podsumowanie wykonanych badań wraz z wnioskami adresującymi zasadność postawionej tezy.

- **Rozdział siódmy** w którym autor przedstawia kierunki dalszych badań.

- **Wykaz cytowanej literatury** obejmującej 215 pozycji publikacyjnych, informacyjnych, broszurowych oraz materiałów konferencyjnych.

2. Ocena tematu, celu i zakresu pracy

Autor przedstawia tezę swojej rozprawy w rozdziale drugim. Teza ta formułuje możliwość określenia istnienia uszkodzenia na wczesnym etapie w materiale na podstawie analizy stanu powierzchni i obszaru przypowierzchniowego w warunkach eksploatacji konstrukcji. Przedstawiony przez doktoranta zakres pracy formułuje takie podejście. Przedstawione przez niego metody oraz sformułowane wskaźniki pozwalają na potwierdzenie pierwszej części pracy. Jednakże pewną wątpliwość budzi zastosowanie takich metod w eksploatacji konstrukcji. Takie sformułowanie pozwala określić, iż przedstawione w pracy metody będą mogły mieć zastosowanie w praktyce eksploatacyjnej. Poprzez to rozumie się ocenę elementu bez konieczności jego demontażu lub uszkodzania. Metody pomiaru twardości wymagają jednakże inwazyjnego podejścia do badanego elementu co może w konsekwencji prowadzić do rozwoju uszkodzenia. Wydaje się więc, że takie sformułowanie nie odzwierciedla w pełni możliwości zastosowania opisanych przez doktoranta metod. Cel pracy jest istotny z punktu widzenia identyfikacji metod pozwalających na ocenę stanu technicznego elementów konstrukcyjnych w szczególności stosowanych w konstrukcjach lotniczych lub przemyśle kosmicznych. Coraz większe wykorzystanie takich materiałów w odpowiedzialnych elementach konstrukcyjnych wymusza poszukiwania i identyfikowania metod oceny konstrukcji a w szczególności symptomów wczesnego procesu powstawania uszkodzenia. Autor w przedstawionej pracy dokonał identyfikacji problematyki oraz przedstawił proponowane rozwiązanie. Głównym celem przedstawionej zatem pracy jest więc możliwość identyfikacji uszkodzenia na wczesnym etapie za pomocą metod oceny powierzchni. W tym celu autor przedstawia model diagnostyczny oparty na wskaźnikach uszkodzeń związanych z wynikowymi sygnałami identyfikacji stanu powierzchni za pomocą znanych metod inżynierii powierzchni. Autor dokonuje weryfikacji przedstawionego modelu za pomocą badań eksperymentalnych oraz oceny wyników również z uwzględnieniem problemu metrologicznego. Przedstawiona do oceny praca w większej części jest zgodna z zaproponowaną tezą z uwzględnieniem w mojej ocenie pewnej niezręczności związanej z sformułowaniem oceny w warunkach eksploatacji konstrukcji. Przedstawione przez autora

działania mają charakter doświadczalny i weryfikujący przedstawioną problematykę a przedstawiona tematyka jest zasadna i celowa. Biorąc powyższe pod uwagę, uważam, iż podjęcie zaproponowanej tematyki jest celowe, przedstawiony zakres tematyczny jest właściwy z uwagi na sformułowaną tezę z wyłączeniem uwagi dotyczącej warunków badań.

3. Ocena rozprawy

Zaproponowane przez autora pracy podejście badawcze zawiera elementy procesu naukowo - badawczego. W pracy przedstawiono wstęp do problematyki badawczej, identyfikację zagadnienia badawczego oraz szczegółowo przedstawiono sposób realizacji badań. Przeprowadzone badania oraz wykorzystana w nich aparatura badawcza została w sposób wyczerpujący przedstawiona. Praca łączy ze sobą podejście analityczno - eksperymentalne właściwe dla dyscypliny nauki jaką jest inżyniera mechaniczna. Autor pracy przedstawia ponadto umiejętność przygotowania i konstruowania specjalizowanego stanowiska pomiarowego obejmującego część pomiarową jak i oprogramowanie rejestrujące wykonane w środowisku cyfrowego przetwarzania danych. Na podstawie przeprowadzonych badań autor dokonuje walidacji uzyskanych badań do założonego przez siebie modelu wskaźnikowego formułując spostrzeżenia związane z otrzymanymi wynikami. Praca zawiera więc niezbędne elementy identyfikujące samodzielną pracę badawczą. Jest w niej proces postawienia tezy badawczej, podstawy teoretyczne problematyki badawczej, przygotowanie i wykonanie eksperymentu badawczego oraz proces analityczny.

Biorąc powyższe pod uwagę uważam, iż praca spełnia wymagania postawione pracom doktorskim w szczególności w dyscyplinie inżyniera mechaniczna.

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem opisu przedstawionego problemu, wyboru metod i zakresu badań oraz sposobu jego rozwiązania zaliczam:

- a) użyteczność problematyki oceny i identyfikacji uszkodzeń w materiałach konstrukcyjnych na wczesnym stadium;
- b) dobrze przygotowaną i przeprowadzoną część badawczo eksperymentalną;
- c) umiejętność przygotowania i realizacji procesu pomiarowego na przygotowanym stanowisku badawczym
- d) weryfikację uzyskanych badań na podstawie badań materiałowych uwzględniających zmianę własności morfologicznych sieci krystalicznej;
- e) uwzględnienie w badaniach problematyki niepewności pomiarowej istotnej dla poprawnej oceny wyników.

Praca nie jest wolna od wad do których zaliczam:

- a) brak szczegółowej analizy literaturowej dotyczącej istniejącego stanu wiedzy w tym zakresie w szczególności w zakresie stopów Inconel;
- b) szereg stylistycznie niepoprawnych sformułowań zawartych w pracy (niewłaściwe zapisy przymiotników lub rzeczowników) lub błędnie sformułowane zdania : np. zdanie drugie na str. 51 w rozdziale 2.1 - cytuję „*O przydatności danej metody do pomiaru nierówności powierzchni decyduje między innymi od rozdzielczość przestrzennej pomiaru oraz wysokości nierówności , jakie mogą być nią zmierzone*”.
- c) w rozdziale III autor bardzo szczegółowo przedstawia stosowaną aparaturę badawczą co niepotrzebnie odciąga czytelnika od głównego nurtu problematyki badawczej;
- d) badania przeprowadzono jedynie dla dwóch próbek co w mojej ocenie może wpływać na wartości graniczne rejestrowanych parametrów;
- e) Brak dobrej czytelności niektórych wykresów lub graficznych form prezentujących dane jak np. Wykres 85 - str.89, czy wykresy na rys. 128 str. 135.
- f) Słabo przeprowadzoną analizę końcową wyników. Autor w rozdziale V syntezyje szereg częściowych wyników które mógłby rozwinąć i omówić i na tej podstawie wyraźnie przedstawić opisane przez niego wnioski dotyczące możliwości identyfikacji przez niego uszkodzeń materiału na wczesnym etapie.

Ponadto oczekuję od autora rozprawy odpowiedzi na poniższe spostrzeżenia:

- W rozdziale 3.2.2. autor identyfikuje metody umożliwiające uzyskanie fizycznych wskaźników uszkodzenia na podstawie pomiarów np. dwójłomności akustycznej. Z jakich powodów te badania nie zostały uwzględnione jako możliwy element stosowania w badaniach eksploatacyjnych?
- Czy można zastosować inne metody identyfikujące takie uszkodzenia (np. Metody magnetyczne identyfikujące wtrącenia/wydzielania)?
- W odniesieniu do postawionej tezy w jaki sposób autor zamierzał wykorzystać przedstawione w pracy metody badawcze w praktyce eksploatacyjnej?
- Na jakie parametry końcowe identyfikacji uszkodzenia mogłoby wpłynąć poddanie badaniom większej ilości próbek (jakiej liczby próbek)?

4. Wniosek końcowy

Praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Macieja Malickiego, jej zawartość i forma pomimo opisanych wad wskazuje na jego wiedzę w zakresie metod oceny i identyfikacji uszkodzeń w badanym materiale na podstawie oceny jego powierzchni. Sposób realizacji pracy wskazuje na umiejętność prowadzenia przez kandydata prac badawczych i przygotowania eksperymentu badawczego.

Podsumowując uważam, że poziom przedstawionej pracy **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu art. 13 pkt 7 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz 1789) w związku z Art. 179, ust.3, Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r., „Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym” (Dz.U. z 2022 r., poz 574 z późn zm.)**. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Macieja Malickiego do publicznej obrony jego rozprawy.

