

dr hab. inż. Damian Krenczyk, prof. PŚ
Katedra Automatyzacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18A
44-100 Gliwice

Gliwice, 27.08.2022r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Gawłowskiego pt. ***„Modelowanie wpływu dziedziczności technologicznej na właściwości powierzchni wybranego stopu tytanu”***

Podstawa opracowania

Recenzję opracowano na podstawie pisma prof. dr. hab. inż. Jerzego A. Sładka, Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej nr M.00-520-58/2022, z dnia 22.06.2022 r.

Obszar problemowy i aktualność tematyki rozprawy

Podjęta przez Doktoranta w rozprawie tematyka dotyczy zagadnień związanych z problemami technologicznego kształtowania warstwy wierzchniej, w szczególności doboru warunków procesu technologicznego w kształtowaniu powierzchni warstwy wierzchniej wybranego stopu tytanu, kluczowych dla procesu eksploatacyjnego. W centrum rozważań znajduje się obszar projektowania procesów obróbki, mający zapewnić odpowiednie charakterystyki powierzchni wytworzonej elementów węzła tarcia systemu eksploatacji, pozwalających na uzyskanie wymaganej trwałości systemów tribologicznych oraz ich niezawodności. Jest to niewątpliwie jeden z obszarów, w którym konieczne jest ciągłe wypracowywanie i wdrażanie właściwych w danych warunkach metod projektowania procesu technologicznego. Potrzeba ciągłego rozwoju w tym zakresie wynika głównie z często podnoszonych w literaturze przedmiotu problemów z projektowaniem elementów poddawanych cyklicznym obciążeniom, gdzie bardzo ważną rolę odgrywają defekty związane z procesem obróbki mechanicznej. W tym kontekście Doktorant, biorąc pod uwagę istotę, jaką odgrywa w procesie kształtowania właściwości funkcjonalnych powierzchni proces technologiczny, trafnie wskazuje na konieczność przeprowadzenia badań powierzchni, zarówno tych ukształtowanych w procesie technologicznym, jak i tych modyfikowanych w procesie eksploatacji. Ponadto, na podstawie przeglądu literatury przedmiotu, w aspekcie potrzeby sterowania parametrami obróbki, zapewniających pożądaną jakość powierzchni, Doktorant celnie wskazuje na dziedziczność technologiczną jako potencjalnie istotne zagadnienie w analizie i ocenie przebiegu

procesu technologicznego. Postuluje modelowe ujęcie dziedziczności technologicznej po kolejnych sekwencjach obróbki wykończeniowej wybranego stopu tytanu jako podstawę do racjonalnego doboru warunków procesu obróbki i kształtowania właściwości powierzchni warstwy wierzchniej. Kolejne obszary problemowe, poruszane w pracy, związane są z możliwością określenia wpływu struktury geometrycznej powierzchni elementu wykonanego z danego materiału na właściwości funkcjonalne pod kątem ich zastosowań w implantologii. W tym obszarze szczególnie aktualne są problemy związane z właściwościami tribologicznymi stosowanych materiałów, zwłaszcza stopów tytanu, które powodują ograniczenia w ich stosowalności w układach, w których występują duże obciążenia kontaktowe.

Podsumowując, recenzowana praca koncentruje się na rozwiązywaniu problemów wybranych zagadnień inżynierii procesów wytwarzania, dotyczy takich szczegółowych zagadnień, jak: procesy zarządzania przetwarzaniem materiałów, w tym wytwarzania produktów przez formowanie kształtu, zmianę wymiarów czy modyfikację powierzchni i kształtowania warstwy wierzchniej w procesach obróbki wiórowej i ścierniej. Podejmowane zagadnienia obejmują również projektowanie procesów i zastosowanie metod analizy decyzyjnej i modeli matematycznych w zarządzaniu wiedzą produkcyjną. Przedstawione w rozprawie zagadnienia oraz wspomniane obszary problemowe mieszczą się w dyscyplinie inżynieria produkcji (wg klasyfikacji obowiązującej w momencie otwarcia przewodu doktorskiego) oraz szerzej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Wpisują się także z powodzeniem w zidentyfikowaną lukę badawczą, związaną z brakiem kompleksowej, jakościowej i ilościowej charakterystyki struktury geometrycznej powierzchni warstwy wierzchniej, i koniecznością analizy badanych powierzchni z zastosowaniem podejścia opartego na dziedziczności technologicznej. W tym kontekście Doktorant prawidłowo formułuje cele pracy jako: *określenie wpływu kolejnych sekwencji procesu obróbki na zmiany ukształtowania powierzchni warstwy wierzchniej, sprawdzenie w jaki sposób wartości parametrów opisujących ukształtowanie (topografię) powierzchni mogą być dziedziczone przez kolejne sekwencje obróbki oraz budowę ogólnego modelu dziedziczności dla badanego stopu tytanu.*

Wybór tematyki badawczej, poruszanej przez Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie, uważam za uzasadniony, a omawiane w niej treści są aktualne i wpasowują się w zagadnienia związane z dyscypliną inżynieria mechaniczna. Ponadto zaprezentowane wyniki mogą mieć duże znaczenie praktyczne.

Ocena rozprawy

Oceniana rozprawa liczy 186 stron, składa się z 5 rozdziałów, 3 załączników, listy cytowanej bibliografii liczącej 226 pozycji, zestawienia tabel i rysunków oraz streszczenia w językach polskim, angielskim i rosyjskim. W załącznikach zamieszczono otrzymane wyniki dla technologicznie i eksploatacyjnie ukształtowanej powierzchni warstwy wierzchniej oraz ilustracje morfologii powierzchni. Pracę uzupełniono także o wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń.

W pracy można wyróżnić trzy zasadnicze części. Część pierwsza obejmuje krótkie wprowadzenie (rozdział 1), przegląd literatury naukowej oraz sformułowanie hipotezy i celów naukowych pracy (rozdziały 2-3). Rozdział 2 poświęcono przedstawieniu charakterystyki tytanu jako pierwiastka. Szczegółowo opisano podstawowe właściwości fizyczne i mechaniczne tytanu, dużo uwagi poświęcono gatunkom technicznym czystego tytanu i jego stopów oraz ich zastosowaniom. Przedstawiając publikacje w obszarze zastosowań stopów tytanu, Doktorant trafnie wskazuje na trudności związane z opracowaniem stopów tytanu o lepszych parametrach mechanicznych, fizykochemicznych, tribologicznych i funkcjonalnych w zastosowaniach w medycynie. Uważam jednak, że temu zagadnieniu (wskazanym trudnościom) należało poświęcić więcej miejsca. Kolejne podrozdziały poświęcono opisowi funkcjonalności materiałów tytanowych, konsekwentnie koncentrując się na obszarze biomateriałów. Cenny jest zawarty tam opis właściwości mechanicznych i tribologicznych oraz fizykochemicznych i funkcjonalnych. Autor celnie wskazuje na wyzwania w omawianym obszarze, wskazując jak właściwości fizykochemiczne stopów tytanu wpływają na ich właściwości użytkowe. Wskazuje również na zadania stojące przed współczesną inżynierią produkcji, związane z uzyskaniem powierzchni o odpowiedniej strukturze geometrycznej przez modyfikacje technologii kształtowania powierzchni. Powyższe zagadnienia uzupełnia przegląd zastosowania stopów tytanu w technice medycznej oraz metod wytwarzania materiałów tytanowych. Następny podrozdział opisuje, ważne z punktu widzenia prowadzonych później przez Doktoranta badań, zagadnienia związane z metodyką badań właściwości warstwy wierzchniej, w szczególności jej ukształtowania pod względem jakości oraz funkcjonalności. Wskazano na potencjał w określaniu propozycji modyfikacji procesu technologicznego, opierając się na otrzymanych wynikach badań tarciowo-zużyciowych ukształtowania powierzchni warstwy wierzchniej. Odrębny podrozdział dotyczy pojęcia dziedziczności technologicznej. Zaprezentowany przegląd literaturowy badań dotyczących dziedziczności technologicznej pozwolił na sformułowanie luk badawczych. Podniesiono kwestie małej przydatności wskazanych analiz w praktyce ze względu na założony poziom abstrakcji, jak również braku kompleksowej, jakościowej i ilościowej charakterystyki struktury geometrycznej powierzchni warstwy wierzchniej. W odniesieniu do powyższych sformułowań Doktorant stwierdza, iż modelowe ujęcie z wykorzystaniem korelacji oraz regresji wielorakiej może być odpowiednią metodą wyjaśnienia procesu dziedziczności technologicznej, co można uznać za rozwinięcie i uzupełnienie wiedzy w tym obszarze. W rozdziale 3 sformułowano hipotezę pracy, odpowiadającą zidentyfikowanym lukom badawczym w odniesieniu do doboru warunków procesu obróbki i kształtowania właściwości powierzchni warstwy wierzchniej stopu tytanu Ti-6,5Al-1,3Si-2Zr. Trafnie i logicznie sformułowano również cele naukowe pracy.

Drugą częśći pracy (obszerny rozdział 4) Doktorant poświęcił opisowi badań własnych. Sformułowano cele badań dotyczące określenia wpływu parametrów procesu technologicznego na charakterystykę technologicznego ukształtowania powierzchni warstwy wierzchniej stopu tytanu Ti-6,5Al-1,3Si-2Zr, wpływu parametrów definiujących ukształtowanie powierzchni warstwy wierzchniej po procesie technologicznym na parametry definiujące ukształtowanie po

procesie eksploatacji oraz określenia występowania dziedziczności technologicznej w przedmiocie badań poprzez budowę modelu dziedziczności technologicznej. Dla tak sformułowanych celów ustalono szczegółowo program badań obejmujący część badawczo-analityczną oraz analityczno-modelową. Zabrakło natomiast szerszego uzasadnienia przyjęcia przez Autora ograniczenia zakresu parametrów badań do charakterystyk powierzchni warstwy wierzchniej, zawężonego do stwierdzenia, że *wykonanie (...) badań, wykorzystujących dużą liczbę zmiennych jest czasochłonne i nieopłacalne. (...) program badań winien więc obejmować tylko parametry badań, które pozostają w wąskim zakresie*. Badania struktury geometrycznej powierzchni prowadzono po każdym z pięciu poszczególnych etapów zaprojektowanego procesu technologicznego oraz po badaniach eksploatacyjnych, w warunkach odzwierciedlających modelowe warunki pracy węzła tarcia. Uzyskanym wynikiom badań ukształtowania (topografii) powierzchni stopu tytanu Ti-6,5Al-1,3Si-2Zr poświęcono bardzo obszerny podrozdział 4.5.1. Wyniki reprezentatywne, stanowiące podstawę później sformułowanych wniosków, obejmowały m.in.: mapy powierzchni 2D, obrazy aksonometryczne 3D, funkcje charakteryzujące ukształtowanie badanych powierzchni, określenie charakteru ukształtowania pod względem izotropii oraz kierunkowości tekstury powierzchni, jak również dane ilościowe i wyniki analizy uwzględniające parametry opisujące topografię i profil powierzchni. Należy podkreślić kompleksowy i wyczerpujący charakter przeprowadzonych przez Doktoranta pomiarów i analiz. Cenne podsumowanie stanowią wykonane syntetyczne opisy zawierające charakterystyki dla każdego z etapów procesu, wynikające z przeprowadzonych analiz ukształtowania powierzchni obrobionej, a także sformułowane wnioski dotyczące m.in. wpływu ziarna diamentu na topografię i cechy powierzchni obrabianej, możliwości poprawy topografii obrabianej powierzchni poprzez sekwencyjną obróbkę czy dostrzeżone dziedziczone cechy powierzchni, będące wartym podkreślenia wkładem Doktoranta. Podobny zakres oraz wartość stanowią, przedstawione w podrozdziale 4.5.2, wyniki badań i analiz ukształtowania powierzchni po eksploatacji. Szczególnie cenna wydaje się analiza wyników badań ukształtowania powierzchni po eksploatacji, odniesiona do wyników ukształtowania powierzchni w procesie obróbki. Choć za szczególnie omówiono uzyskane wyniki w odniesieniu do poszczególnych parametrów, pewny niedosyt budzi brak ogólniejszych wniosków, poza wskazaniem na trendy. Warto zaznaczyć, że zidentyfikowane zależności pozwoliły na sformułowanie założenia (w odniesieniu do analizowanego stopu) na temat możliwych mechanizmów zachodzenia dziedziczności technologicznej. Poczynione obserwacje oraz wnioski pozwoliły na wyznaczenie modelu dziedziczności technologicznej i miernika dziedziczności technologicznej (podrozdział 4.6), które uważam za jedno z najważniejszych osiągnięć Doktoranta. Mankamentem natomiast, w mojej ocenie, jest zbyt skrótowa dyskusja nad stwierdzeniem dotyczącym przeciętnej dziedziczności technologicznej w przypadku badanego stopu tytanu Ti-6,5Al-1,3Si-2Zr.

Trzecia część rozprawy obejmuje podsumowanie i sformułowanie wniosków końcowych. W rozdziale 5 wskazano na przydatność modelowego ujęcia dziedziczności technologicznej w odniesieniu do wybranego stopu tytanu. Poddano dyskusji wyniki badań uzyskane z zastosowaniem proponowanego podejścia i sformułowano wnioski pozwalające na

14

stwierdzenie, że zbudowany model poszerza wiedzę na temat kształtowania geometrii powierzchni warstwy wierzchniej, jak również korelacji/relacji pomiędzy technologicznie a eksploatacyjnie ukształtowaną powierzchnią. Dyskusyjna natomiast jest kwestia postulowanego przez Autora uniwersalnego charakteru zaproponowanego modelu oraz stwierdzenia, że *można za jego pomocą opisać zarówno stop tytanu Ti-6,5Al-1,3Si-2Zr jak i wszystkie pozostałe biomateriały*, bez podania ograniczeń i wymaganych działań w odniesieniu do innych materiałów. Rozprawę kończy sformułowanie propozycji przyszłych prac badawczych w omawianym obszarze.

Reasumując, uważam, że kompozycja rozprawy, układ rozdziałów i podrozdziałów są poprawne oraz podporządkowane postawionemu i konsekwentnie zrealizowanemu przez Doktoranta celowi. Lista cytowanych źródeł literaturowych obejmuje pozycje istotne i aktualne. Autor nie ustrzegł się jednak błędów natury językowej.

Oryginalne osiągnięcia rozprawy

W swojej pracy Doktorant poszukuje odpowiedzi na postawiony problem badawczy, dotyczący technologicznego kształtowania warstwy wierzchniej, w szczególności modelowania wpływu dziedziczności technologicznej w kształtowaniu powierzchni warstwy wierzchniej wybranego stopu tytanu. Identyfikuje luki badawcze oraz odpowiadające im braki metodyczne. Odpowiedzią na postawiony problem badawczy, są:

- określenie wpływu kolejnych sekwencji procesu technologicznego wybranego stopu tytanu na zmiany ukształtowania powierzchni warstwy wierzchniej,
- określenie wpływu parametrów definiujących powierzchnię warstwy wierzchniej po procesie technologicznym na parametry definiujące powierzchnię warstwy wierzchniej po procesie eksploatacji,
- model dziedziczności dla badanego stopu tytanu wraz ze zdefiniowanym miernikiem dziedziczności technologicznej,
- określenie wpływu struktury geometrycznej powierzchni elementu wykonanego z wybranego materiału na właściwości funkcjonalne pod kątem zastosowania w implantologii.

Należy podkreślić, że wyniki pracy odpowiadają aktualnym potrzebom przemysłu i poza wartością naukową mają znaczną wartość użytkową.

Uwagi ogólne i dyskusyjne

Poza uwagami zawartymi w poprzednich częściach recenzji można sformułować następujące uwagi ogólne i dyskusyjne:

- W rozdziale 4.4 Doktorant przedstawia kolejne etapy zaproponowanego procesu technologicznego, które obejmują operacje *szlifowania*, *matowienia* oraz trzy operacje *docierania*, pomijając uzasadnienie takiego zaprojektowania procesu technologicznego.

Dopiero na str. 74 (podrozdział 4.5) znajduje się informacja, że *jednym z powodów zastosowania trzech zabiegów docierania wykończeniowego było sprawdzenie, w jaki sposób ukształtowanie powierzchni stopu tytanu może wpłynąć na współczynnik tarcia i intensywność zużywania elementu współpracującego*. Uważam, że te informacje powinny zostać podane przed zaprezentowaniem procesu technologicznego obróbki. Podobne uwagi dotyczą braku uzasadnienia przyjętych parametrów w procesie badań tarciovo-zużyciowych (4.4.2), także w odniesieniu do liczby próbek.

- W rozdziale 4.5 powinna znaleźć się informacja w jaki sposób dokonano wyboru obszarów pomiarowych, zaprezentowanych m.in. w tabeli 18. Wątpliwości może także budzić oznaczenie *SZLIF-1, SZLIF-2, SZLIF-3* – czy dotyczą one kolejnych płytek, czy innych obszarów pomiarowych na płycie?
- W pracy Doktorant często odwołuje się do przeprowadzonej analizy nieparametrycznej czy parametrycznej, w odniesieniu do analizy jakościowej lub ilościowej (np. str. 105). Uważam, że pojęcia te należało wyjaśnić we wstępie do rozdziału, ponieważ używane nazewnictwo może sugerować analizy statystyczne w odniesieniu do testów parametrycznych i nieparametrycznych, szczególnie w kontekście stosowanych (Tabela 40 czy 49) testów Kołmogorowa-Smirnowa czy Testu Fishera.
- Podane na str. 93 stwierdzenie, że *Rysunek 30 – Rysunek 32 przedstawiają wzrosty średniej wartości analizowanych parametrów w wyniku sekwencyjnej obróbki wykończeniowej*, w mojej ocenie jest nieuprawnione - przedstawione wykresy (rys. 30 i 31) nie są monotoniczne.
- W odniesieniu do wniosków formułowanych w podrozdziale 4.5.2 (str. 110), na podstawie danych zawartych na obrazach aksonometrycznych powierzchni obrobionej (porównania EWW_{DOC3}-(1-3) (Tabela 43) z obrazami z Tabeli 22), dotyczących wysokości wzniesień, dyskusyjne jest stwierdzenie o *zauważalnym zwiększeniu wysokości wzniesień*. Zabrakło informacji czy porównania dokonano dla tych samych obszarów.

Uwagi szczegółowe

Poza uwagami natury ogólnej i dyskusyjnej można sformułować następujące uwagi szczegółowe:

- Podrozdziały 1.6. *Dziedziczność technologiczna* oraz 1.7. *Podsumowanie części teoretycznej* powinny mieć numeracje 2.6 i 2.7.
- Podrozdział 2.6, str. 57 – nie objaśniono oznaczeń p oraz a_n , występujących we wzorach (2) i (3).
- Rozdział 4 – należałoby ujednolicić oznaczenia etapów obróbki (na rys. 22 oznaczono je cyframi arabskimi, natomiast w tab. 16 cyframi rzymskimi)
- Podrozdział 4.5.2, str. 111 – w Tabeli 43 obraz aksonometryczny 3D dla EWW_{DOC3}-3, nie odpowiada zaprezentowanej mapie powierzchni 2D.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawione w niniejszej recenzji uwagi mają głównie charakter dyskusyjny i nie podważają mojej pozytywnej oceny rozprawy. Na podstawie powyższej oceny stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie aktualnego problemu naukowego, natomiast podejście Autora do zagadnień prezentowanych w pracy dowodzi, że posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

Uważam, że opiniowana rozprawa mgr. inż. Grzegorza Gawłowskiego pt. „**Modelowanie wpływu dziedziczności technologicznej na właściwości powierzchni wybranego stopu tytanu**” spełnia warunki stawiane przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki w odniesieniu do rozpraw doktorskich (Dz.U. z 2016 r. poz. 882). Wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Naukową Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Damian Kunk