

Prof. dr hab. inż. Wojciech WIELEBA
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii
50-370 Wrocław, ul. Łukasiewicza 5,
tel. (071) 3202774,
E-mail: wojciech.wieleba@pwr.edu.pl

Wrocław, 3 lipca 2018 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Krzywickiej
p.t.

„Właściwości użytkowe stopu tytanu poddanego laserowemu teksturowaniu powierzchni”

(Podstawa formalna recenzji: pismo Dziekana Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 24.05.2018 r.)

1. Ocena podjętego tematu

Właściwości użytkowe materiałów stosowane na elementy maszyn, które współpracują ze sobą ciernie, zależą w znacznym stopniu od stanu ich powierzchni oraz własności cienkiej warstwy materiału znajdującego się bezpośrednio pod powierzchnią tzw. warstwy wierzchniej. W jej obszarze przebiega większość procesów i zjawisk związanych z tarciem, zużywaniem, korozją, itp. Sama powierzchnia elementów ślizgowych, a zwłaszcza jej struktura geometryczna, w znaczący sposób wpływa na intensywność przebiegu procesów tribologicznych. Wytworzenie odpowiedniej struktury powierzchni roboczej wpływa niewątpliwie na okres użytkowania węzłów tarcia w maszynach i urządzeniach. Jest to szczególnie ważne, gdy dotyczy elementów sztucznych stawów człowieka. Obecnie przeciętna trwałość endoprotez stawu biodrowego wynosi w Polsce około 7 lat (na świecie 15-20 lat). W czasie eksploatacji zachodzi zużywanie jego elementów, co skutkuje pojawieniem się produktów zużycia wewnątrz ciała człowieka. Przyczyniają się one do pojawienia się wielu poważnych schorzeń a także skracają trwałość samej endoprotezy. Jest to niezwykle istotne z punktu widzenia osób, które przeszły zabieg alloplastyki stawu.

Jedną z metod zmniejszających intensywność zużywania pary trącej jest odpowiednie teksturowanie powierzchni jej elementów. Prowadzenie tego typu zabiegów technologicznych nie jest nowym zagadnieniem, co jest widoczne między innymi w prezentowanym w dysertacji przeglądzie literatury. Niewiele jednak pozycji literaturowych dotyczy kompleksowej oceny właściwości użytkowych stopów tytanu, których powierzchnię poddano teksturowaniu metodą mikroobróbki laserowej. Opracowanie tego trudnego zagadnienia podjęła w swej dysertacji Pani mgr inż. Monika Krzywicka. Próba

określenia wpływu struktury geometrycznej powierzchni elementów metalowych endoprotez jest cenna zarówno z punktu widzenia poznawczego jak i użytkowego. Zasadne wydaje się więc podjęcie tej problematyki przez Doktorantkę.

Przedstawiona do oceny rozprawa wypełnia częściowo lukę wiedzy dotyczącą powiązania charakterystyk struktury powierzchni z właściwościami tribologicznymi wybranych par trących polimer-tytan występujących przede wszystkim w zastosowaniach bioinżynierskich.

Tematyka oraz zakres rozprawy obejmują ogólne zagadnienia związane z technologią wytwarzania teksturowanej powierzchni materiału metalicznego oraz jej wpływem na właściwości eksploatacyjne par ślizgowych polimer-metal. Zatem, pomimo nawiązywania do zagadnień bioinżynierskich, rozprawa jest ściśle związana z **budową i eksploatacją maszyn**.

2. Charakterystyka ogólna – układ pracy, treść, literatura, redakcja

Praca jest podzielona na siedem rozdziałów. Zawierają one studia literaturowe Doktorantki nad zagadnieniami związanymi z materiałami stosowanymi w endoprotezach stawu kolanowego, kształtowaniem własności stopów tytanu poprzez odpowiednią modyfikację ich powierzchni a także problematyką tarcia i zużywania naturalnych i sztucznych stawów człowieka. W dalszej części rozprawy Doktorantka przedstawiła technologię laserowego teksturowania powierzchni oraz badania, których celem było określenie wpływu parametrów technologicznych mikroobróbki laserowej na geometrię teksturowania powierzchni oraz mikrotwardość, mikrostrukturę i skład chemiczny warstwy wierzchniej badanego materiału. Główną część dysertacji stanowi rozdział prezentujący wynik badań własnych Doktorantki nad właściwościami stopu tytanu poddanego mikroobróbce laserowej. Przedstawione w nim zostały rezultaty badań, których celem było określenie wpływu tekstury powierzchni na wybrane właściwości stopu tytanu związane z jego zastosowaniem w endoprotezach stawu kolanowego. Badania dotyczyły przede wszystkim właściwości tribologicznych, odporności na korozję, własności adhezyjnych oraz zdolności tworzenia biofilmu na powierzchni badanego materiału. Ocenione zostały w ten sposób wybrane właściwości eksploatacyjne stopu tytanu, którego powierzchnia została poddana teksturowaniu mikroobróbką laserową.

Rozprawa jest edytowana na 144 stronach. Wykaz literatury zawiera 151 pozycji aktualnej, zarówno zagranicznej jak i krajowej literatury. Edycja całości jest poprawna, praca jest właściwie zilustrowana graficznie a dane uporządkowane są tabelarycznie. Uwagi dotyczące drobnych błędów wraz z komentarzem zamieszczam w załączniku do recenzji.

Zawartość poszczególnych rozdziałów pracy:

Pracę tworzy wstęp, siedem rozdziałów oraz streszczenie. Na początku zamieszczono wstęp, który jest wprowadzeniem do podjętej w rozprawie problematyki.

Pierwsze trzy rozdziały stanowią przegląd literatury. W rozdziale pierwszym przedstawiono własności stopu tytanu będącego przedmiotem przeprowadzonych przez Doktorantkę badań i analiz. Omówiono w nim również metody modyfikowania powierzchni wytworzonych z niego elementów. Kolejny rozdział prezentuje tematykę związaną z alloplastyką stawu kolanowego. Przedstawiono w nim biomechanikę stawu, klasyfikację endoprotez oraz omówiono stosowane materiały i ograniczenia eksploatacyjne. Rozdział trzeci dotyczy zagadnień tarcia i zużywania elementów stawów naturalnych i sztucznych. Omówiono w nim między innymi metody badań tribologicznych endoprotez oraz rodzaje zużywania materiałów charakterystyczne dla tego typu węzłów tarcia. Kolejne rozdziały stanowią omówienie części badawczej rozprawy. Rozdział czwarty zawiera cel i tezę pracy oraz jej zakres. W rozdziale piątym scharakteryzowano metodę laserowego teksturowania powierzchni. Przedstawiono stanowisko badawcze umożliwiające wytworzenie określonej tekstury na powierzchni badanego materiału oraz plan badań z zastosowaniem eksperymentu planowanego. W dalszej części omówiono wyniki badań, których celem było określenie wpływu parametrów mikroobróbki laserowej na geometrię otrzymanej tekstury, mikrostrukturę warstwy wierzchniej, jej mikrotwardość i skład chemiczny. W kolejnym rozdziale, stanowiącym główną część rozprawy, omówiono przyjęte przez Doktorantkę metody badań własności stopu tytanu oraz wyniki przeprowadzonych badań. Zaprezentowane wnioski i analizy dotyczyły przede wszystkim wpływu geometrii tekstury powierzchni badanego materiału na jego właściwości w aspekcie zastosowań bioinżynierskich. Badania dotyczyły tarcia i zużywania współpracujących ślizgowo elementów polimer (PE-UHMW) - metal (stop tytanu), odporności stopu tytanu na korozję i właściwości adhezyjnych jego powierzchni. Dodatkowo oceniono zdolność tworzenia biofilmu na powierzchni stopu tytanu w zależności od jej tekstury. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie i wnioski końcowe. Na końcu pracy zamieszczono wykaz literatury i streszczenia w języku polskim i angielskim.

3. Uwagi ogólne

Przedmiotem opiniowanej rozprawy była ocena właściwości użytkowych stopu tytanu, na którego powierzchni wytworzono teksturę geometrycznych w formie regularnych, sferycznych wgłębień. Przedstawione zostały wyniki badań zarówno w obszarze technologicznym, jak i eksploatacyjnym. **Niewątpliwym walorem pracy jest tematyka związana z nowoczesnymi technologiami wytwarzania teksturowanej powierzchni na elementach metalowych z wykorzystaniem mikroobróbki laserowej.** Zagadnienie podjęte w rozprawie jest ważne i aktualne ze względu na potencjalny obszar stosowania w elementach trących, który obejmuje nie tylko w endoprotezy ale również zespoły maszyn i urządzeń, w których występuje tarcie. Szczególnie ważna jest poruszana w rozprawie problematyka tribologiczna oraz zagadnienia adhezyjne.

Po przeprowadzeniu analizy obecnego stanu wiedzy Doktorantka sformułowała tezy dotyczące korelacji między parametrami tekstury a wybranymi właściwościami

eksploatacyjnymi badanego materiału. Były nimi opory tarcia przy współpracy z materiałem polimerowym (polietylenem PE-UHMW), wartość energii swobodnej (adhezja), zmiana własności elektrochemicznych a także ilość przylegających do powierzchni drobnoustrojów (biofilm). **Przedstawione przez Doktorantkę rezultaty badań potwierdziły postawione tezy. Różnorodne analizy procesów i zjawisk występujących na powierzchni oraz w warstwie wierzchniej badanego stopu tytanu, który poddano mikroobróbce laserowej omówione w rozprawie są dodatkowym jej walorem.**

Sposób przygotowania powierzchni badanego stopu tytanu poprzez dobór parametrów mikroobróbki laserowej był efektem badań przeprowadzonych przez Doktorantkę w obszarze technologicznym. **Opisanie wpływu tych parametrów na uzyskaną teksturę oraz praktyczne wykorzystanie tej wiedzy do wytworzenia próbek do badań eksploatacyjnych stanowi dodatkowy atut rozprawy.** Reasumując, przedstawione zależności pomiędzy parametrami obróbki laserowej a otrzymaną strukturą tekstury powierzchni stopu tytanu mogą być wykorzystane przy wytwarzaniu elementów, dla których struktura powierzchni wpływa na ich właściwości eksploatacyjne.

Na uwagę zasługuje również bogactwo przeprowadzonych przez Doktorantkę badań, które obejmowały wspomnianą wcześniej analizę wpływu parametrów mikroobróbki laserowej na geometrię teksturowania powierzchni stopu tytanu (mikroskopia skaningowa SEM, mikroskopia optyczna cyfrowa,), badania własności warstwy wierzchniej, takich jak mikrostruktura powierzchni teksturowanej (mikroskopia metalograficzna, SEM, analiza EDS) i mikrotwardość (metoda Vickersa) a także badania właściwości eksploatacyjnych analizowanego materiału metalicznego. W ramach tych ostatnich Doktorantka przeprowadziła badania stopu tytanu współpracującego ślizgowo z polietylenem PE-UHMW wykorzystując dwa rodzaje tribotestów: typu walec-pryzma (T-09) i typu trzpień-płytką (T-17), badania korozyjne (potencjodynamiczne), badania swobodnej energii powierzchniowej, która wiąże się z właściwościami adhezyjnymi, oraz badania oceniające zdolność adhezji wybranych szczepów bakterii do powierzchni stopu tytanu. Doktorantka uzupełniła badania tribologiczne analizą mikroskopową powierzchni ślizgowej elementów. Jej celem było określenie intensywności zużycia. Dodatkowo przeprowadziła analizę widma składu chemicznego w obszarze zagłębień powierzchni teksturowanej, w których gromadziły się produkty zużycia.

Atutem pracy jest prowadzenie przez Doktorantkę badań z wykorzystaniem eksperymentu planowanego, który znacząco zmniejszył liczbę doświadczeń skracając tym samym czas badań. Jednocześnie zakres informacji otrzymanych na podstawie wyników badań pozostał na podobnym poziomie, jak dla eksperymentu całkowitego. Niewątpliwym walorem jest również statystyczne opracowanie wszystkich wyników ilościowych uzyskanych podczas badań. Analiza statystyczna umożliwiła Doktorantce ocenę istotności przyjętych do opisu funkcji regresji oraz dopasowanie modelu matematycznego do danych empirycznych.

Wymienione zalety rozprawy świadczą o umiejętnościach prowadzenia przez Doktorantkę badań oraz analizy uzyskanych wyników i stanowią wartość jej rozprawy oraz dorobek.

Oprócz niewątpliwych zalet pracy muszę jednak z przykrością wskazać na pewne mankamenty.

1. Analiza literatury nie jest zbyt obszerna. Została przeprowadzona na 31 stronach. Przedstawiono przede wszystkim metody wytwarzania powierzchni teksturowanych oraz problematykę alloplastyki stawu kolanowego. Opisana została między innymi biomechanika stawu, materiały stosowane w endoprotezach oraz występujące problemy związane z ich eksploatacją. Ponadto omówione zostały zagadnienia związane z tarcieniem i zużywaniem w naturalnych i sztucznych stawach człowieka. Zabrakło jednak moim zdaniem szerszego omówienia literatury dotyczącej problematyki tribologicznej par trących polimer-metal. Pominęto m.in. wpływ parametrów ruchowych oraz struktury geometrycznej powierzchni (chropowatości) elementu metalowego na procesy tarcia i zużycia współpracującego materiału polimerowego. Zagadnienia te są istotne w aspekcie badań własnych Doktorantki przedstawionych w dalszej części rozprawy. Zabrakło również przykładowych rysunków, schematów, zdjęć bądź wykresów prezentowanych w źródłach literaturowych, które dodatkowo ilustrowałyby opisywaną w tej części rozprawy problematykę badawczą a także potencjalne zastosowanie teksturowania powierzchni w elementach maszyn np. łożyskach ślizgowych. Ponadto brakuje krótkiego podsumowania kończącego przegląd literatury, w którym Doktorantka mogła wykazać potrzebę przeprowadzenia swoich badań i analiz zawartych w dysertacji.
2. Wnioski kończące większość rozdziałów stanowi raczej spostrzeżenia. Wnioski wymagają wyjaśnienia zaobserwowanych rezultatów i powinny zawierać odpowiedź na pytanie dlaczego zaobserwowano takie a nie inne rezultaty. Lepszym tytułem byłoby w takim przypadku „Podsumowanie”.
3. W opisie prowadzonych przez Doktorantkę badań tribologicznych nie zostały podane parametry, które wpływają na wartość siły tarcia oraz intensywność zużycia, np. chropowatość powierzchni elementu metalowego w obszarze pomiędzy zagłębieniami wynikającymi z teksturowania.
4. Czy Doktorantka analizowała różnice powierzchni styku próbek z elementami współpracującymi, które wynikają z różnego stopnia pokrycia teksturą oraz rozmiarów zagłębień (badania na testerze T-17)? Przy stałej sile obciążającej badany węzeł tarcia, różna powierzchnia styku może przyczynić się do różnego średniego nacisku jednostkowego i tym samym wpłynąć na wartości współczynnika tarcia materiału polimerowego po metalu.
5. Zalecaną funkcją regresji opisującą wyniki badań prowadzonych z wykorzystaniem planu rotalnego jest wielomian drugiego stopnia [Mańczak K. *Technika planowania eksperymentu*, Kukielka L. *Podstawy badań inżynierskich*].

Dlaczego jako model matematyczny opisujący ilościowo wyniki badań przyjęto liniową funkcję regresji?

6. Zabrakło, moim zdaniem, w rozdziale podsumowującym dysertację wyraźnego wyjaśnienia zamieszczonych w niej wyników badań tzn. zabrakło odpowiedzi na pytanie, dlaczego zaobserwowano taki a nie inny przebieg uzyskanych charakterystyk.

Mimo powyższych uwag rozprawę oceniam wysoko zarówno w aspekcie poznawczym, jak i metodologicznym. Doktorantka wykazała się umiejętnością analizy aktualnego stanu wiedzy dotyczącego metod modyfikacji powierzchni stopów tytanowych, opracowała program badań a także wykorzystwała szeroki wachlarz metod badawczych. Umożliwiło to jej ocenę wpływu teksturowania powierzchni mikroobróbką laserową na właściwości użytkowe stopu tytanu.

Podsumowując należy stwierdzić, że Doktorantka zrealizowała w pełni postawione w rozprawie cele a także potwierdziła postawione tezy. Uważam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska stanowi wkład Autorki w dziedzinę **Budowa i Eksploatacja Maszyn**.

4. Uwagi szczegółowe

Szczegółowa analiza pracy zmusza do wskazania drobnych usterek edycyjnych oraz drugorzędnych błędów typu językowego. Wymieniam je w załączniku, który jest integralną częścią niniejszej opinii.

5. Ocena i wniosek końcowy

• *Zagadnienie naukowe i oryginalność wyników*

Rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Krzywickiej dotyczy jednoznacznie określonego i jasno przedstawionego zagadnienia naukowego związanego z technologią wytwarzania powierzchni teksturowanych i jej wpływu na właściwości użytkowe stopu tytanu w aspekcie zastosowania tego materiału na elementy endoprotezy stawu człowieka. Uzyskane wyniki badań można określić, jako oryginalne, mogące przysporzyć praktyce technicznej informacji umożliwiającej poprawne trwałości elementów współpracujących ślizgowo. **O oryginalności pracy świadczy między innymi określenie przez Doktorantkę wpływu parametrów technologii mikroobróbki laserowej na geometrię zagłębień tekstury powierzchni stopów tytanu.** Opiniowana rozprawa jest dowodem na to, że Doktorantka bardzo dobrze orientuje się w obszarze technologii mikroobróbki laserowej oraz problemach, jakie dotyczą wytwarzania tekstury na powierzchni materiałów metalicznych.

• *Metody badawcze*

Zastosowane w pracy metody badawcze należy ocenić wyróżniająco. Doktorantka dysponuje bardzo bogatym warsztatem badawczym. Prowadziła badania z wy-

korzystaniem wielu metod dotyczących zarówno analiz materiałowych, jak i badań dotyczących właściwości eksploatacyjnych. Przeprowadzone analizy uzyskanych wyników świadczą, że posiada ona umiejętność oceny własnych dokonań. **Wśród istotnych osiągnięć Doktorantki należy uznać, że dzięki przyjętym metodom badawczym możliwe było określenie wpływu wybranych parametrów charakteryzujących teksturę powierzchni na własności użytkowe analizowanego stopu tytanu.**

• *Stopień rozwiązania zagadnienia*

Stopień rozwiązania zagadnienia oceniam pozytywnie. Opisane w rozprawie badania i analizy wyraźnie rozszerzają wiedzę o bardzo złożonych procesach zachodzących w czasie eksploatacji stopów tytanu m.in. w endoprotezach stawu kolanowego.

Doktorantka zrealizowała cele pracy, którymi było dobranie parametrów mikroobróbki laserowej służącej otrzymaniu zakładanego teksturowania powierzchni stopu tytanu oraz ocena wpływu wybranych parametrów tekstury na wybrane właściwości użytkowe stopu tytanu. **Analiza parametrów mikroobróbki laserowej kształtującej strukturę geometryczną tekstury na powierzchni elementu wytworzonego z badanego stopu tytanu jest jednym z istotnych osiągnięć Doktorantki.** W dysertacji zabrakło jedynie, moim zdaniem, dokładnego wyjaśnienia przyczyn zmian badanych właściwości użytkowych w zależności od tekstury powierzchni badanego stopu.

Wydaje się, że prezentowana praca powinna być kontynuowana w zakresie badań zaproponowanym przez Doktorantkę, zwłaszcza w obszarze badań tribologicznych i korozyjnych, które wiążą się ściśle właściwościami eksploatacyjnymi badanych materiałów. Wpłynie to niewątpliwie na jakość projektowanych węzłów tarcia, w których element metalowy współpracuje z materiałem polimerowym.

• *Wniosek końcowy*

Przedstawiony w ocenianej rozprawie materiał badawczy jest oryginalnym dorobkiem Doktorantki - ma on zarówno walory poznawcze jak i użytkowe. Wymienione wcześniej uwagi i zastrzeżenia nie umniejszają w żadnym stopniu merytorycznej wartości pracy, którą oceniam pozytywnie. Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że rozprawa Pani mgr inż. Moniki Krzywickiej pt. „Właściwości użytkowe stopu tytanu poddanego laserowemu teksturowaniu powierzchni” w pełni spełnia wymagania przewidziane w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zmianami Dz. U. z 2005 r. nr 164, poz. 1365) z późniejszymi zmianami. **W związku z tym wnoszę o przyjęcie rozprawy w dyscyplinie naukowej „Budowa i Eksploatacja Maszyn” i proponuję Radzie Naukowej Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej dopuszczenie jej do publicznej obrony.**



Załącznik do recenzji

rozprawy doktorskiej p. mgr inż. Moniki Krzywickiej pt. „Właściwości użytkowe stopu tytanu poddanego laserowemu tekstutowaniu powierzchni” zawierający uwagi szczegółowe dotyczące ww. pracy

Uwagi ogólne

1. Rozprawa jest napisana pod względem językowym poprawnie, chociaż czasem Doktorantka stosuje potoczne określenia, np. pojęcie „niski” stosuje się przede wszystkim do wymiarów (wysokości) z pewnymi wyjątkami np. „niska temperatura”. Przykładowo „niskie właściwości tribologiczne” (s.7), lepiej „niezadowolające właściwości tribologiczne”; „niska gęstość” (s.14) lepiej „mała gęstość”.
2. Niektóre rysunki przedstawiające schematy są niepotrzebne i mogły być zastąpione opisem tekstowym (rysunki 1.1, 1.2)
3. Na rysunku 6.15 a widoczna jest wyraźna zmiana szybkości zużywania elementu polimerowego w przedziale 160 000 – 180 000 cykli. Brakuje komentarza dotyczącego ewentualnej przyczyny.

Uwagi szczegółowe

(Uwagi podane są w kolejności występowania w tekście (s - strona, w - wiersz, g - od góry, d - od dołu)

1. Tytuł rozdziału 2 „Endoprotezoplastyka stawu kolanowego”. W nagłówkach stron tego rozdziału jest „Alloplastyka stawu kolanowego”.
2. Dzielenie jednego rysunku na dwie strony powoduje, że jest on mało czytelny zwłaszcza, gdy jego opis znajduje się na kolejnej stronie (rysunki 5.3–5.8, 6.15, 6.16, 6.18, 6.19)
3. Niezbyt czytelne tabele prezentujące raporty zawierające wyniki analizy regresji i inne opracowania statystyczne (tab.5.4, 5.5, 5.7, 6.2–6.5, 6.7, 6.9, 6.12, 6.13–6.21, 6.23–6.25). W tabelach pojawiają się oznaczenia (np. b^* , r^2 , itp.), których nie ma w opisie lub wykazie oznaczeń.
4. s.77. W prezentowanym w tekście zestawieniu parametrów tekstury brakuje moim zdaniem podania wartości siły tarcia.
5. s.84, rys.6.10. Nieczytelny opis osi przedstawiającej czas.
6. Rysunki 6.33 i 6.39. Dla ułatwienia analizy można byłoby uzupełnić wykresy przestrzenne o wariant warstwowy (topograficzny).