

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Kalinowskiego

p.t. „*Właściwości eksploatacyjne powłok DLC poddanych teksturowaniu laserowemu*”

1. Dane ogólne

Niniejszą recenzję opracowano na podstawie Uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 19 czerwca 2026 r.

Praca doktorska została wykonana w Centrum Laserowych Technologii Metali Politechniki Świętokrzyskiej i PAN oraz na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej pod opieką promotorską prof. dr hab. inż. Norberta Radka przy udziale dra inż. Piotra Sęka jako promotora pomocniczego.

1. Podstawa oceny pracy i schemat recenzji

Recenzję opracowano odnosząc się bezpośrednio do wymogów stawianych pracom doktorskim przez Ustawę *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Art. 187, *Dziennik Ustaw z dnia 20 kwietnia 2023 r., tekst jednolity*), przy uwzględnieniu wskazówek opracowania Rady Doskonałości Naukowej z 2022 r. p.t. „Recenzje w postępowaniach o awans naukowy.” Recenzję uzupełniono o sekcje odnoszące się do uwag dyskusyjnych wobec rozprawy, a także do poziomu redakcyjnego i językowego. W podsumowaniu recenzji zawarto syntetyczną ocenę rozprawy i sformułowano wniosek końcowy.

2. Czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta?

Spełnienie tego warunku można ocenić przede wszystkim na podstawie *Rozdziałów 1, 2, 3 i 4* rozprawy. W Rozdziale 1 Doktorant omawia aktualny stan wiedzy dotyczący właściwości warstw wierzchnich elementów maszyn i narzędzi. Wskazuje na szczególne znaczenie powłok przeciwwzyciowych, stosowanych dla poprawy właściwości funkcjonalnych elementów maszyn i wydłużających okres eksploatacji. Formułuje najważniejsze właściwości eksploatacyjne zaliczając je do wytrzymałościowych, tribologicznych, antykorozyjnych i dekoracyjnych. Sekcja 1.2. poświęcona jest charakteryzacji powłok węglowych, w tym w szczególności powłok węglowych diamentopodobnych *DLC*. Doktorant omawia strukturę powłok *DLC* z punktu widzenia obecności i udziału wiązań atomów węgla o różnym typie hybrydyzacji, sp^3 oraz sp^2 i

podaje klasyfikację powłok *DLC*. Szczegółowo opisuje metody syntezy powłok *DLC* oraz ich właściwości zależne od procesu wytwarzania. 11 stron tekstu sekcji 1.2 mgr inż. Artur Kalinowski poświęcił na szczegółową dyskusję właściwości tribologicznych i antykorozyjnych powłok *DLC*, co jest istotnie skorelowane z głównymi zagadnieniami badawczymi przedstawionymi we *Wstępie* dysertacji. Rozdział dotyczący powłok *DLC* uzupełniają akapity odnoszące się do powłok *DLC* z domieszkami innych pierwiastków, przemysłowych zastosowań powłok *DLC* oraz nanoszenia na powierzchnie robocze narzędzi.

W Rozdziale 2 Doktorant przedstawił metody wytwarzania tekstury na powierzchni materiału, polegające na usunięciu materiału, dodawaniu materiału, przemieszczaniu materiału i formowaniu przez zużycie, wskazał główne cele i efekty strukturyzacji powierzchni. W Rozdziale 3 rozwinął, jego zdaniem jedno z najważniejszych metod wytwarzania tekstury, wykorzystujące wiązkę promieniowania laserowego. W pierwszym akapicie pojawia się definicja tekstury (str.51), która zdecydowanie powinna rozpoczynać Rozdział 2. Laserową teksturyzację powierzchni, prowadzącą, w zależności od celu i parametrów procesu do zmiany swobodnej energii powierzchni, autor omówił skrótowo, ale przekonująco. W podrozdziale 3.3 zawarł analizę opisanych w literaturze przypadków teksturowania laserowego powłok *DLC*. Szczegółowe omówienie wyników opublikowanych prac jest szczególnie ważne. Wnioski z tej analizy Doktorant zawarł w Rozdziale 5, podkreślając niedostateczne wyjaśnienie zagadnień dotyczących wpływu promieniowania laserowego o różnych długościach fali na efekty teksturyzacji powłok *DLC*, optymalizacji geometrii tekstury wytwarzanej laserowo na powłokach *DLC* i wpływu tej teksturyzacji na właściwości eksploatacyjne, w szczególności w odniesieniu do uszczelnień czołowych.

Rozdziały 1, 2, 3 i 4 to zwięzły wykład zagadnień teoretycznych, wykorzystujący szeroki zakres literatury, potwierdzający w pełni wymaganie wymienione w tytule tego rozdziału recenzji, czyli dobry poziom ogólnej wiedzy teoretycznej Doktoranta.

3. Czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego?

W Rozdziale 5 pracy autor jednoznacznie określił problem badawczy, którego rozwiązanie miało nastąpić w wyniku realizacji doktoratu: „*Problemem badawczym jest ocena właściwości eksploatacyjnych wytworzonych struktur powierzchniowych o pożądanых cechach przy użyciu technologii PVD i mikroobróbki laserowej*”. Za słuszne i w pełni adekwatne do pracy o charakterze technologicznym przyjmuję, że Doktorant zrezygnował z formułowania tez pracy. Precyzyjnie natomiast zdefiniował cel poznawczy, cel naukowy oraz cel aplikacyjny. W dążeniu do realizacji tych celów postawił 7 zadań, obejmujących m.in. analizę literaturową, 2 zadania

o charakterze technologicznym (*Modyfikacja warstwy wierzchniej stali 4H13 oraz 100Cr6 poprzez naniesienie powłok DLC; Opracowanie technologii mikroobróbki laserowej*), 3 zadania o charakterze laboratoryjno-pomiarowym (*Analiza geometrii i morfologii, Określenie grubości osadzonych warstw oraz ich właściwości fizykochemicznych i mechanicznych, Badanie wpływu mikroobróbki laserowej na właściwości przeciwzużyciowe i eksploatacyjne - testy tribologiczne, pomiary swobodnej energii powierzchniowej i kąta zwilżania modyfikowanych laserowo powierzchni, badania uszczelnień czołowych i badania korozyjne*). Doktorant przewidział ponadto *Opracowanie modelu erodowania laserowego*. Zadania te przedstawił dodatkowo w postaci szczegółowego schematu blokowego.

Z powyższych uwag wynika jednoznacznie, że postawiony problem ma charakter naukowy.

Rozwiązanie postawionego problemu zawiera się w Rozdziale 6, 7, 8, 9 i 10 i stanowi główną część dysertacji. W Rozdz. 6 Doktorant uzasadnił wybór dwu materiałów do badań: stali 100Cr6 (stosowanej na elementy łożysk tocznych, pierścienie, wałki, igły, kulki pracujące w temperaturze ok. 20°C i w środowisku niekorozyjnym; martenzytycznej stali chromowej 4H13 (wykorzystywanej do wytwarzania narzędzi skrawających, pomiarowych, tnących, łożysk kulkowych i narzędzi chirurgicznych, o wysokiej odporności na ścieranie oraz korozję). Omówił mikrostrukturę obu gatunków stali. Scharakteryzował proces PVD nanoszenia warstw DLC na wytypowane materiały we współpracy z firmą zewnętrzną. W rozdziale 7 przedstawił 9 wykorzystywanych w realizacji pracy specjalistycznych stanowisk badawczych, przeznaczonych m.in. do: realizacji mikroobróbki laserowej; analizy mikrostruktury naniesionych powłok; pomiaru twardości i modułu sprężystości; badania przyczepności powłoki do podłoża; pomiaru swobodnej energii powierzchniowej powłok DLC; pomiaru struktury geometrycznej powierzchni i głębokości tekstury; badań tribologicznych; badania odporności korozyjnej; oceny jakości i trwałości uszczelnień czołowych podczas pracy. Szczegółowo scharakteryzował kluczowe dla realizacji pracy dwa stanowiska badawcze:

- do realizacji mikroobróbki laserowej, jako podstawowej technologii wykorzystanej do wytworzenia tekstury;
- do oceny jakości i trwałości uszczelnień czołowych, która była końcowym testem zdolności aplikacyjnych opracowanych w ramach realizacji pracy modyfikacji powłok DLC.

Przedstawione stanowiska badawcze to z pewnością wspólny dorobek zespołu kierowanego przez Promotora pracy, przy współudziale Promotora pomocniczego, ale zrealizowanie tak szerokiego zakresu badań zasługuje na uznanie.

Ważne rozważania i wyniki przedstawił Doktorant w Rozdziale 8, gdzie dokonał doboru parametrów mikroobróbki warstwy *DLC* za pomocą lasera TruMicro ($\lambda=343$ nm, $E_f=12,6$ μ J, $t_f=6,2$ ps) oraz lasera SPI 3.1 ($\lambda=1064$ nm, $E_f<0,55$ mJ, $t_f=15 - 220$ ns). Ostateczny dobór parametrów laserowego wytwarzania tekstury poprzedzony był pomiarami współczynnika absorpcji warstwy *DLC*, średnicy obszaru oddziaływania zogniskowanej wiązki i obliczeniem fluencji. Serie eksperymentów dla zmiennych parametrów procesu umożliwiły określenie minimalnej głębokości wycięcia ablacyjnego. Korzystniejsze pod tym względem okazało się zastosowanie lasera SPI, umożliwiające wykonanie rowka w warstwie *DLC* o głębokości 1,74 μ m, czyli znacznie mniejszej niż grubość powłoki (4,2 μ m). Doktorant zaproponował także różne geometrie tekstury.

Dalsza część wyników przedstawionych w dysertacji dotyczyła badań powłok *DLC* naniesionych na dobrane gatunki stali. Znamienne jest, że dla zwiększenia przyczepności powłoki do podłoża zastosowano naniesienie warstw pośrednich z wolframu i chromu. Doktorant zaprezentował i szczegółowo przedyskutował wyniki badania geometrii powłok, składu i morfologii w wielowarstwowym układzie stal-chrom-wolfram-powłoka *DLC*, badania przyczepności powłok, nanotwardości oraz mikrotwardości.

W sekcjach 9.6, 9.7 i 9.8 Doktorant zrelacjonował badania dwu rodzajów próbek: z naniesioną powłoką *DLC* oraz z powłoką *DLC* i laserowo wytworzoną teksturą. We wszystkich rodzajach badań tribologicznych (wyznaczanie współczynnika tarcia, oporów tarcia oraz odporności na zatarcie) próbki z powłoką *DLC* i teksturą osiągały lepsze wyniki od próbek z powłoką *DLC* niemodyfikowaną laserowo. W badaniach swobodnej energii powierzchniowej i kąta zwilżania próbek z powłoką *DLC* i teksturą stwierdzono złożony wpływ teksturowania na składowe dyspersyjną i polarną, przy jednoczesnym wzroście wartości swobodnej energii powierzchniowej. Bardzo ważne z punktu widzenia zastosowań elementów maszyn i narzędzi z powłoką *DLC* i teksturą są badania odporności korozyjnej. Badania takie przeprowadził Doktorant w ramach współpracy międzynarodowej z Uniwersytetem w Żylinie (Słowacja). O ile naniesienie powłoki *DLC* na oba gatunki stali poprawiło odporność korozyjną, to próbki z teksturowaną powłoką *DLC* wykazały częściowe pogorszenie właściwości ochronnych (mniejsza wartość potencjału korozyjnego E_{kor} i nieco większa wartość prądu korozyjnego I_{kor}). Efekt ten zdaniem Doktoranta może być wynikiem zmian struktury powłoki spowodowanych oddziaływaniem wiązki laserowej. Scharakteryzowane powyżej badania do bardzo dobra realizacja **celu poznawczego** pracy.

Badania zaprezentowane w sekcji 9.9 to test realizacji **celu aplikacyjnego** pracy. W badaniu tym pierścień ślizgowy miał powierzchnię pokrytą powłoką *DLC* z naniesioną teksturą. Współczynnik tarcia dla powierzchni z teksturą miał wyraźnie mniejszą wartość dla zwiększanego parametrycznie parametru G , skorelowanego z wielkością obciążenia. Ta korzystna tendencja jeszcze się pogłębiała w wyniku zwiększenia liczby struktur na powierzchni powłoki.

Przedstawione w Rozdziałach 1-8 stan wiedzy, wyniki badań i analizy byłyby wystarczające dla pracy doktorskiej. Doktorant jednakże dodatkowo dokonał udanej próby stworzenia modelu matematycznego dla procesu mikroobróbki laserowej powłoki *DLC* wykorzystując metodykę *Planowania eksperymentu* (DoE). Celem tego działania było umożliwienie prognozowania wyników mikroobróbki powłok *DLC* nanoszonych różnymi metodami. Doktorant trafnie dokonał analizy czynników, którą przedstawił na Rys. 10.1 i dokonał wyboru najistotniejszych, czyli energii impulsu laserowego i prędkości skanowania wiązki. Jako wyjściowe (obserwowane) wielkości wybrał zużycie masowe, współczynnik tarcia oraz swobodną energię powierzchniową, co dobrze odzwierciedla przewidywane zastosowanie modyfikowanych powłok *DLC*. Opracował statystycznie wyniki 25 testów mikroobróbki laserowej, badań tribologicznych oraz badania energii powierzchniowej i na tej podstawie sformułował zależności matematyczne wielkości wyjściowych od czynników najistotniejszych. Okazało się m.in., że zużycie masowe zależy praktycznie tylko od energii impulsu, współczynnik tarcia jest funkcją obu niezależnych parametrów, podobnie jak swobodna energia powierzchniowa. Tym samym Doktorant **zrealizował cel naukowy** rozprawy.

4. Czy rozprawa doktorska wykazała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta?

Doktorant przeprowadził analizę literaturową zagadnień związanych fizyką, wytwarzaniem, modyfikacją i efektami teksturyzacji powłok *DLC*. Precyzyjnie określił zadania i chronologię ich realizacji. Wykorzystywał zaawansowane urządzenia badawcze o charakterze technologicznym. We współpracy z zakładem przemysłowym (Zakład Maszyn i Łożysk Specjalnych Sp. Z o. o. ISKRA) zrealizował technologię PVD nanoszenia warstw *DLC*. Wykorzystując wyposażenie rodzimego zakładu naukowego zrealizował badania w zakresie mikroobróbki laserowej warstw *DLC* naniesionych na wybrane podłoża. Przeprowadził wszechstronne badania właściwości różnych wariantów powłok wykorzystując wiele specjalistycznych stanowisk pomiarowych. Zakres badań i ich chronologia bezbłędne. Opracowane modele matematyczne dla procesu

mikroobróbki powłok DLC to dobry przykład rozważań teoretyczno-doświadczalnych. W opinii recenzenta Doktorant **wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

- 5.1. Na początku Rozdziału 8 pojawia się stwierdzenie: *"Wysoka intensywność promieniowania, duża energia impulsu oraz jego krótki czas oddziaływania inicjują zjawisko absorpcji wielofotonowej – wiele fotonów przekazuje energię jednemu elektronowi podłoża."* Jest to stwierdzenie zbyt śmiałe. Jest kilka warunków wystąpienia absorpcji dwufotonowej, m.in. wartość energii impulsu, która dla lasera TruMicro (343nm) wynosi 3,61 eV, a dla lasera SPI (1064 nm) tylko 1,17 eV, ekstremalnie duże natężenie promieniowania w ognisku, bardzo duża częstotliwość powtarzania impulsów. W zacytowanej przez Doktoranta pracy [167] stosowano laser ekscymerowy o długości fali 248 nm, którego energia impulsu jest rzędu 5 eV, co przekracza wartość energii przerwy energetycznej (dla warstw DLC rzędu 2-4 eV, w zależności od stopnia hybrydyzacji) - jest to wystarczająco wysoka energia, by zachodziła bezpośrednia absorpcja jednofotonowa. W przypadku mikroobróbki impulsami nanosekundowymi (15–200 ns) o długości fali 1064 nm absorpcja wielofotonowa praktycznie nie zachodzi. Byłoby korzystne, gdyby Doktorant rozwinął ten problem w odpowiedzi dla recenzenta.
- 5.2. Na str. 13 jest zdanie: *"Ich (tzn. powłok węglowych) unikalne właściwości, takie jak wysoka twardość, niski współczynnik tarcia, wysoka odporność na zużycie oraz dobre przewodnictwo elektryczne..."* a na stronach 14-15 oraz w Tabeli 1.1. charakteryzuje powłoki DLC oraz grafit, których przewodnictwo jest krańcowo różne.
- 5.3. Na str. 98 omówiono wyznaczenie fluencji promieniowania - należało zdefiniować, czy jest to wartość fluencji odpowiadająca oddziaływaniu pojedynczego impulsu, czy skumulowana wartość fluencji.
- 5.4. Str. 51 – „Większość procesów technologicznych realizowanych za pomocą wiązki laserowej opiera się ciepłnym oddziaływaniu światła na materiały nietransparentne”
- 5.5. Str. 53 – „brak mechanicznego oddziaływania na materiał” – sformułowanie nieściśle (ciśnienie wiązki może być od kilku kPa aż do kilku MPa).
- 5.6. Błędy stylistyczne i językowe

Autor nie ustrzegł się sformułowań o charakterze żargonu technicznego, których nie powinno być w pracach naukowych, np.: str. 10 - *"dość obszernej ilości literatury"*; str. 46 – *"następuje reorganizacja materiału w obrębie powierzchni"*; str.47 – rys.2.1, wśród metod wytwarzania

tekstury poprzez usunięcie materiału wymieniono: Tekstutowanie laserowe oraz Honowanie laserowe (czyli technologie), a obok Laser ekscymerowy z maską, Laser wspomagany CNC (które technologiami nie są); str.48 – wśród procesów fizycznych brakuje metody LMD; str.52 – „brak zużycia wiązki laserowej”; str. 55 – teksturę wykonano w kształcie czaszy; str. 56, wiersz 25 - ...”wpływ parametrów pracy lasera takich jak częstotliwość, długość fali na podłożu ze stali narzędziowej..., brakuje wyrazów: na wytworzenie struktury na podłożu...; str.65 – Długość impulsu lasera...; str. 111, wiersze 6-7 - ...co świadczy o większym rozrzucie wysokości na powierzchni...; str.129 – jest...”odciążaniu wgłębnika oddziaływującego na próbkę”, a powinno być: „oddziałującego na próbkę”.

Powtórzenia fragmentów tekstu: str. 54, wiersze 11-16 oraz str.55, wiersze 4-9 są b. podobne.

6. Ocena poziomu redakcyjnego rozprawy

Rozprawa zawiera 211 stron tekstu. Spis literatury cytowanej w treści rozprawy obejmuje 176 pozycji, z których 127 opublikowano po roku 2010, a 58 prac po roku 2020. W pracy zamieszczono 83 rysunki i wykresy oraz 46 tabel. Praca zredagowana jest przejrzysto. Tekst zawarty został w 11 rozdziałach i uzupełniony spisem literatury. Treść poszczególnych rozdziałów odzwierciedla chronologię realizacji doktoratu. Od strony edytorskiej pracę wyróżnia wysoka jakość rysunków i przejrzystość tabel.

7. Podsumowanie i wnioski

Recenzowaną rozprawę oceniam bardzo wysoko, ponieważ z nadmiarem wypełnia kryteria postawione w odpowiedniej Ustawie (punkty 3, 4, 5 niniejszej recenzji). Wskazane nieliczne uwagi dyskusyjne i usterki językowe w niczym nie umniejszają tej ogólnej oceny.

Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i jest znaczącym, własnym wkładem Doktoranta w badania właściwości powłok *DLC*, ich modyfikacji poprzez teksturyzację laserową wraz z udanym przykładem zastosowania wyników badań do uszczelnień czołowych.

Za najważniejsze osiągnięcia rozprawy uważam:

- **dobrze rozeznanie problemów naukowych i technicznych dotyczących powłok DLC i laserowego tekstutowania ich powierzchni;**
- **precyzyjne sformułowanie problemu badawczego oraz celu poznawczego, naukowego i aplikacyjnego pracy i ich pełna realizacja;**
- **szeroki zakres zaplanowanych i przeprowadzonych badań doświadczalnych, także we współpracy międzynarodowej oraz współpracy z firmą przemysłową;**

- **bardzo dobrą znajomość różnorodnych technik badawczych, jak metrologia geometrii i właściwości powierzchni, mikroskopia skaningowa, techniki badań tribologicznych, pomiary energii powierzchniowej;**
- **znajomość i zastosowanie z pozytywnym skutkiem metody Planowania eksperymentu;**

Sylwetkę Doktoranta wyróżnia także wysoka jakość opublikowanych prac, z których 8 jest ściśle związana z tematyką pracy. Mgr inż. Artur Kalinowski opublikował 15 prac (w 8 występuje jako pierwszy autor), a jego indeks Hirscha (według bazy *Scopus*) wynosi 8.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska **mgra inż. Artura Kalinowskiego p.t. „Właściwości eksploatacyjne powłok DLC poddanych teksturowaniu laserowemu”** spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim i nie wymaga uzupełnień ani poprawek. Stosownie do przepisów ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Art. 187, Dz. U. z dnia 20 kwietnia 2023 r., tekst jednolity) wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ze względu na przedstawione powyżej osiągnięcia naukowe Doktoranta, rozpoznawalność naukową za granicą oraz wysoki ogólny poziom pracy doktorskiej wnioskuję, aby Rada Naukowa Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej, uwzględniając kryteria obowiązujące w Politechnice Świętokrzyskiej, uznała pracę doktorską mgr inż. Artura Kalinowskiego za wyróżniającą.

