

Katedra Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Koszalińska
ul. Raclawicka 15-17
75-620 Koszalin

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Orдона pt.:

*Kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej w procesie szlifowania
wglębnego powierzchni walcowych wyrobów ze stali EI961 i AMS6308
po obróbce cieplno-chemicznej*

Recenzję wykonano na zlecenie Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Andrzeja Kawalca zgodnie z pismem z dnia 26.11.2025 roku.

1. Przedmiot recenzji

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Tomasza Orдона pt. „*Kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej w procesie szlifowania wglębnego powierzchni walcowych wyrobów ze stali EI961 i AMS6308 po obróbce cieplno-chemicznej*” została opracowana pod nadzorem promotora dr hab. inż. Witolda Habrata, profesora Politechniki Rzeszowskiej oraz promotora pomocniczego dr inż. Marcina Sałaty. Praca składa się z wprowadzenia, 8 rozdziałów, spisu literatury, oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

2. Ocena aktualności podjętej tematyki, celów rozprawy oraz zgodności jej zakresu z dyscypliną

Właściwa realizacja procesu szlifowania stali poddanych obróbce cieplno-chemicznej ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia wymaganej dokładności geometrycznej wytwarzanych elementów, uzyskania odpowiedniej jakości warstwy wierzchniej oraz zachowania integralności warstwy dyfuzyjnej. Niewłaściwie dobrane parametry szlifowania mogą prowadzić do przegrzania materiału, powstawania mikropęknięć, przypaleń szlifiernych lub uszkodzeń struktury warstwy utwardzonej, co w konsekwencji obniża trwałość oraz niezawodność eksploatacyjną wyrobów.

Zagadnienie to nabiera szczególnego znaczenia w przypadku operacji wykończeniowych realizowanych na elementach stanowiących części silników lotniczych, gdzie obowiązują wyjątkowo

rygorystyczne wymagania jakościowe i bezpieczeństwa. W takich zastosowaniach nawet niewielkie odchyłki geometryczne lub defekty powierzchniowe mogą prowadzić do pogorszenia parametrów pracy zespołów mechanicznych, a w skrajnych przypadkach do awarii. Dlatego proces szlifowania musi być ściśle kontrolowany i zoptymalizowany pod kątem właściwości materiału, rodzaju obróbki cieplno-chemicznej oraz warunków eksploatacji gotowych elementów.

Przedstawiona w rozprawie problematyka naukowa dotyczy analizy wpływu parametrów i warunków realizacji procesu szlifowania wgłębnego powierzchni walcowych wyrobów z materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym poddanych uprzedniej obróbce cieplno-chemicznej na wartości składowych sił szlifowania, efekty technologiczne procesu oraz wielkość zużycia promieniowego stosowanych narzędzi.

Tak zdefiniowana tematyka rozprawy ma na celu wypełnienie luki badawczej wskazanej przez Doktoranta w podsumowaniu analizy literatury i równocześnie dostarczyć ma odpowiedzi na kluczowe problemy dotyczące jakości i niezawodności części lotniczych wytwarzanych w przedsiębiorstwie w którym realizowane było wdrożenie wyników prac naukowych.

W tym kontekście podjętą przez Doktoranta tematykę badawczą uznaję za aktualną i ważną zarówno ze względów poznawczych jak i aplikacyjnych.

Doktorant jako cel naukowy rozprawy przyjął modelowanie wpływu procesu szlifowania wgłębnego powierzchni walcowych (ze szczególnym uwzględnieniem oddziaływań mechanicznych i zużycia ściernic) na kształtowanie się technologicznej warstwy wierzchniej wyrobów ze stali EI961 po azotowaniu i stali AMS6308 po nawęglaniu, stosowanych w technice lotniczej.

Tak zdefiniowany cel naukowy zapewniać ma wiedzę niezbędną do realizacji celu wdrożeniowego pracy zmierzającego do opracowania wytycznych dla technologii szlifowania wgłębnego części lotniczych poddanych uprzednio obróbce cieplno-chemicznej.

Sformułowanie celu naukowego rozprawy i jego powiązanie z celem wdrożeniowym uznaję za poprawne i odpowiadające uprzednio wskazanej luce badawczej. Nadmienić należy również fakt, że przedstawiony cel badawczy stanowi naturalną kontynuację wcześniejszych działań badawczo-wdrożeniowych przedsiębiorstwa Pratt & Whitney Rzeszów związanych z wdrożeniem nowoczesnych procesów obróbki cieplno-chemicznej.

Doktorant sformułował hipotezy badawcze. Hipotezy te mają jednakże ogólnikowy charakter. Wynika on z zastosowania nieprecyzyjnych sformułowań takich jak: „istotne ograniczenie sił szlifowania”, „zmniejszenie ryzyka powstawania karbów”, „wymagana jakość powierzchni” bez wskazania miar oceny, oczekiwanych poziomów zmian oraz wielkości referencyjnych do których będziemy je odnosić. Czyni to tak sformułowane hipotezy trudnymi do jednoznacznej weryfikacji eksperymentalnej z zachowaniem rygoru statystycznego.

Uznając ważność etapu formułowania hipotez w pracy naukowej należy równocześnie zauważyć, że występuje obiektywna trudność z ich poprawnym sformułowaniem w przypadku prac o charakterze wdrożeniowym. W mojej opinii, w przypadku pracy ukierunkowanej na efekty aplikacyjne i wdrożeniowe prowadzonych badań, korzystniej jest definiować pytania badawcze wywodzone bezpośrednio z celu rozprawy. Takie podejście pozwala na ukierunkowanie procesu badawczego, a dostarczenie odpowiedzi na pytania badawcze na drodze prac eksperymentalnych, prowadzi do zdefiniowania nowej wiedzy oraz wskazania obszarów jej praktycznego zastosowania. Proces ten obejmuje więc wszystkie istotne aspekty rozprawy doktorskiej osiągnięte przez formułowanie i testowanie hipotez badawczych.

Wskazany przez Autora zakres prac badawczych koncentruje się na realizacji celu naukowego i wdrożeniowego rozprawy i obejmuje:

- charakterystykę i dobór narzędzi ściernych oraz parametrów kształtowania jej powierzchni czynnej oraz parametrów procesu szlifowania;
- analizę i modelowanie wpływu parametrów i warunków realizacji procesu szlifowania na wartości składowych siły szlifowania;
- analizę i modelowanie wpływu parametrów kształtowania powierzchni czynnej ściernic oraz parametrów szlifowania na topografię powierzchni obrobionych;
- analizę morfologii mikrostruktury warstwy wierzchniej oraz detekcję i analizę przypaleń szlifierskich;
- badania i analizy dynamiki zużycie promieniowego ściernic oraz ich wpływ na zmiany wartości składowych sił szlifowania oraz parametrów topografii powierzchni obrobionych.

Przedstawione w rozprawie cele naukowe i wdrożeniowe odpowiadają tematyce rozprawy. Zadania badawcze stanowią zbiór umożliwiający realizację głównych celów rozprawy. Tematyka pracy mieści się w *dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych* i obejmuje zagadnienia związane z *dyscypliną inżynieria mechaniczna*.

3. Merytoryczna ocena rozprawy

3.1. Ocena poprawności analizy materiałów źródłowych

W części teoretycznej dysertacji Doktorant omawia zagadnienia związane z charakterystyką procesów obróbki cieplno-chemicznej stali, dokonuje analizy wpływu tych procesów na poprawę właściwości eksploatacyjnych wyrobów stosowanych w technice lotniczej. Następnie charakteryzuje wpływ parametrów procesu kształtowania powierzchni czynnej ściernic oraz parametrów i warunków realizacji procesu szlifowania na kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej. Szczególną uwagę Autor rozprawy zwraca na omówienie wyników badań dotyczących procesów szlifowania stali azotowanych i nawęglanych.

W analizie danych źródłowych zauważalne jest niepełne odniesienie się Doktoranta do zagadnień związanych z pomiarem oraz charakterystyką powierzchni czynnej ściernicy. W analizie wymienione są takie parametry jak: gęstość ostrzy skrawających, wysokość wyniesień czy też kształt ziaren ściernych (rys. 1.25) jednakże bez omówienia ich wpływu na proces obróbki. Analiza wpływu tych czynników jest przedmiotem wielu prac dotyczących teorii procesów szlifowania, a ich praktyczne wykorzystanie w ocenie stanu ściernicy oraz analizie oddziaływań w strefie szlifowania jest ważnym aspektem aktualnie realizowanych prac naukowych.

Część teoretyczną pracy kończy podsumowanie przeglądu i analizy literatury zawierające wskazanie luki badawczej, którą Autor rozprawy zamierza wypełnić. Doktorant wskazuje na potrzebę opracowania metodyki doboru parametrów szlifowania oraz narzędzi, która pozwoli zminimalizować ryzyko powstawania uszkodzeń cieplnych i wad powierzchni, skrócić czas przygotowania produkcji seryjnej oraz podnieść jakość i niezawodność części lotniczych.

Analizę źródeł literaturowych oraz sformułowane w jej wyniku wnioski oceniam pozytywnie.

3.2. Ocena stopnia realizacji założonych celów rozprawy

Doktorant, realizując cele naukowe rozprawy, przyjął szeroki zakres badań i analizy efektów technologicznych procesu szlifowania, który obejmował:

- Badania wpływu parametrów i warunków realizacji procesu szlifowania na wybrane zmienne procesowe oraz efekty technologiczne procesu szlifowania stali stosowanych w przemyśle lotniczym. Badania przeprowadzono dla szerokiego zakresu ściernic z ziarnami z elektrokorundu szlachetnego oraz ściernic z 10%, 20% i 50% domieszką ziaren z mikrokorundu spiekanego. Zakres badań obejmował ocenę wpływu parametrów kształtowania oraz parametrów realizacji procesu obróbki na wartości składowych sił szlifowania, wybrane parametry chropowatości powierzchni obrabianej (S_a , S_q , S_dq oraz R_a i R_z) oraz wielkości charakteryzujące mikrostrukturę warstwy wierzchniej.
- Modelowanie efektów technologicznych procesu szlifowania wgłębnego powierzchni walcowych ze stali EI196 (po procesie azotowania) oraz stali AMS6308 (po procesie nawęglania).
- Analizę procesu zużycia promieniowego ściernic oraz jego wpływu na zmienne procesowe oraz efekty technologiczne procesu szlifowania wgłębnego powierzchni walcowych ze stali poprzednio poddanych obróbce cieplno-chemicznej.

Powyższy zakres badań obejmował niezbędne etapy umożliwiające realizację celu naukowego i wdrożeniowego pracy.

Doktorant przedstawił szeroki opis zastosowanej metodyki prowadzenia badań eksperymentalnych. W wyniku prowadzonych badań Autor rozprawy określił parametry i warunki realizacji procesu szlifowania z zastosowaniem konwencjonalnych oraz modyfikowanych narzędzi ściernych zapewniających uzyskanie stanu warstwy wierzchniej bez obecności wad mogących negatywnie wpłynąć na właściwości eksploatacyjne wytwarzanych elementów. Doprowadziło to do realizacji jednego z celów wdrożeniowych pracy; istotnego z uwagi na fakt, że wdrożenie dotyczyło wytwarzania odpowiedzialnych części stosowanych w przemyśle lotniczym.

Wyniki prowadzonych badań Doktorant wykorzystał do opracowania modeli statystycznych określających wpływ parametrów procesu kształtowania powierzchni czynnej ściernicy oraz parametrów realizacji procesu szlifowania na wartości składowej normalnej i stycznej siły szlifowania oraz wartości parametru R_a i R_z chropowatości powierzchni obrabianej. Zastosowany uproszczony plan eksperymentu pozwolił na budowę modeli aproksymacyjnych, których zastosowanie ogranicza się do obszaru badanego eksperymentalnie (co Doktorant wyraźnie zaznacza w treści rozprawy). Opracowane modele pozwalają na wizualizację trendów oddziaływania czynników głównych modelu oraz istotności ich wpływu na modelowane wielkości wyjściowe.

Istotnym uzupełnieniem tego etapu prac badawczych powinno być wskazanie kryteriów, jakimi Autor kierował się przy doborze postaci modelu matematycznego, wyborze planu eksperymentu oraz uzasadnienie ich wzajemnego powiązania z przyjętym celem modelowania.

W ramach prowadzonych badań Doktorant oceniał zastosowanie kilku ściernic o zróżnicowanych właściwościach z uwzględnieniem procesu kształtowania ich powierzchni czynnej. W połączeniu z analizą procesu szlifowania dwóch różnych materiałów daje to szeroki zakres badań. Celem analiz było określenie wpływu zarówno charakterystyki narzędzi, jak i sposobu przygotowania ich powierzchni roboczej na przebieg procesu szlifowania. Oddziaływanie tych czynników na warunki obróbki, w szczególności na zjawiska mechaniczne i cieplne zachodzące w strefie kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym, oceniane było w sposób pośredni. Analiza ta prowadzona była na podstawie zmian wartości składowych sił szlifowania oraz wybranych parametrów chropowatości powierzchni.

W kontekście dalszych prac naukowych Doktoranta warto zauważyć, że wspólnym mianowikiem pozwalającym ująć zarówno charakterystykę ściernic o zróżnicowanych właściwościach, jak i wpływ parametrów ich kształtowania, jest zbiór parametrów opisujących mikrotopografię powierzchni czynnej ściernicy. Parametry te w sposób bezpośredni odnoszą się do struktury narzędzia oraz stanu jego powierzchni roboczej, a jednocześnie determinują przebieg zjawisk zachodzących w strefie obróbki oraz pozwalają na ocenę procesów zużycia narzędzia.

Za znaczący etap badań nad doбором narzędzi oraz parametrów realizacji procesu szlifowania materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym uznaje analizę procesu zużycia ściernicy. Analiza obejmowała ocenę zmian zużycia promieniowego ściernicy, zmian składowych sił szlifowania oraz ich wpływu na stan warstwy wierzchniej. Wyniki badań pozwoliły na określenie stosowności modyfikacji narzędzi ściernych z dodatkiem ziaren z mikrokorundu spiekanego w badanym procesie. Dały również podstawy do określenia zaleceń dotyczących częstości odnawiania powierzchni czynnych analizowanych narzędzi zapewniających zachowanie integralności warstwy wierzchniej.

Uzupełnieniem wdrożeniowego efektu pracy jest określenie przez Doktoranta zaleceń dotyczących realizacji procesu szlifowania wglębnego z zastosowaniem analizowanych narzędzi oraz jego wdrożenie do praktyki przemysłowej.

Podsumowując, należy stwierdzić, że wyniki badań i analiz przeprowadzonych przez Doktoranta realizują cele główne rozprawy. Merytoryczną część rozprawy uznaje za poprawną. Realizując poszczególne etapy pracy Doktorant wykazał się umiejętnością prowadzenia badań eksperymentalnych oraz wdrażaniem ich wyników do praktyki przemysłowej.

3.3. Oryginalne osiągnięcia pracy

Do szczególnych osiągnięć Doktoranta wynikających z realizacji podjętego problemu badawczego zaliczam:

- Określenie parametrów i warunków realizacji procesu szlifowania wglębnej powierzchni walcowych wyrobów ze stali EI961 i AMS6308 po obróbce cieplno-chemicznej z zastosowaniem narzędzi z ziarnami z elektrokorundu szlachetnego oraz narzędzi z domieszką ziaren z mikrokorundu spiekanego zapewniających spełnienie wymagań jakościowych wyrobów stosowanych w przemyśle lotniczym;
- Przeprowadzenie badań procesu zużycia narzędzi ściernych i określenie jego wpływu na zmienność składowych sił szlifowania, wybrane parametry chropowatości powierzchni obrabianych oraz stan warstwy wierzchniej obrabianych elementów.
- Określenie zakresu zastosowań analizowanych narzędzi w procesie szlifowania wykończeniowego wyrobów stosowanych w przemyśle lotniczym i ich wdrożenie do praktyki przemysłowej.

3.4. Ocena redakcyjna i edycyjna pracy

Struktura rozprawy doktorskiej odpowiada etapom realizacji badań eksperymentalnych powiązanych z celami rozprawy. Praca jest poprawnie opracowana pod względem edycyjnym i językowym. Można w niej dostrzec pewne pole do korekty, na które zwracam uwagę:

- Tematyka rozdziałów koncentruje się na etapach prac eksperymentalnych. Taka struktura jest przejrzysta, gdy etapy są następcze a wyniki jednego z nich wpływają na realizację kolejnego etapu. W przedmiotowej rozprawie każdy z rozdziałów dotyczy analizy wpływu parametrów i warunków realizacji procesu na odmienne wielkości wyjściowe. Powoduje to

trudności w zbiorczej analizie wpływu parametrów i warunków realizacji procesu na jego jakość.

- Nazwa rozdziału 4 „*Analiza i modelowanie oddziaływań mechanicznych na kształtowanie warstwy wierzchniej*” nie jest jasna i precyzyjna. Zawartość rozdziału nie odnosi się do parametrów charakteryzujących warstwę wierzchnią lecz do składowych sił szlifowania. W takim przypadku adekwatny byłby tytuł: „*Analiza i modelowanie oddziaływań mechanicznych w strefie szlifowania*”.
- Możliwość porównania i analizy topografii powierzchni (przedstawionych zbiorczo między innymi na rys. 5.2, 5.6) poprawiłoby dodanie do nich informacji o zakresie osi x, y, i z oraz przedstawienie obok legendy kolorów histogramu rzędnych.
- W pracy naukowej powinno unikać się sformułowań nieprecyzyjnych, a w odniesieniu do analizy wyników podawać wartości liczbowe potwierdzające stawiany wniosek. Przykłady sformułowań do unikania: „*Ściernica S6 (10% mikrokorundu) zapewniła wyniki **stosunkowo spójne dla poszczególnych posuwów***”; „*co może zwiększać ryzyko **odkształceń morfologii** mikrostruktury lub mikropęknięć*”
- Sformułowanie „*sila normalna*” powinna zostać zastąpiona określeniem składowa normalna siły szlifowania, podobnie w odniesieniu do składowej stycznej.

4. Uwagi do dyskusji i uwagi szczegółowe do pracy

Tematyka rozprawy realizowanej przez Doktoranta dotyka szeregu ważnych zagadnień naukowych, wzbudzających zainteresowanie czytelnika. Poniżej przedstawiam zagadnienia do dyskusji oraz kilka spostrzeżeń, na które warto zwrócić uwagę:

- Wybór postaci modelu, planu eksperymentu oraz metody modelowania ma istotne znaczenie dla opisu analizowanego procesu. W przypadku procesów obróbki ścierniej modele zakładają najczęściej multiplikatywne lub addytywne oddziaływanie czynników. Przyjęcie zarówno addytywnej, jak i multiplikatywnej postaci modelu analizowanego procesu technologicznego jest poprawne, ważne jest jednak by ich wybór był powiązany z celem tworzenia modelu oraz zakresem dostępnych danych doświadczalnych.

W pracy zabrakło jasnego wskazania tych powiązań oraz kryteriów jakimi Autor kierował się na poszczególnych etapach procesu modelowania. Podanie, tych informacji pozwoli powiązać poszczególne etapy decyzyjne procesu modelowania w spójną całość.

- Kinematyka procesu szlifowania wglębnej powierzchni walcowych powoduje odwzorowanie topografii ściernicy bezpośrednio na przedmiocie obrobionym. Stanowić może ona zatem pośrednie źródło informacji o zmianach mikrogeometrii ściernicy następujących w wyniku zużycia. W tym kontekście przydatne w analizie powierzchni obrobionej jest wyodrębnienie i analiza obszarów które powiązać można ze śladami obróbkowymi pozostawionymi przez aktywne ziarna ściernic.

Jakie parametry oceny topografii obrobionej Doktorant uznaje za istotne do przeprowadzenia takiej oceny i jak widzi możliwość ich wykorzystania w praktyce przemysłowej?

- W ocenie powierzchni ważne jest wskazanie zastosowanych metod przetwarzania danych poprzedzających wyznaczenie parametrów jej struktury geometrycznej - między innymi metod filtracji i ich parametrów. Jaką procedurę i parametry przyjęto w analizie powierzchni z zastosowaniem profilometru optycznego?
- Na różnych etapach badań eksperymentalnych Doktorant z początkowego zestawu ściernic stosował jedynie wybrane. Co stanowiło kryterium wyboru narzędzi na tych etapach badań, zwłaszcza w odniesieniu do materiału obrabianego?

- Jaka przesłanka stała za wyborem do badań narzędzi ściernych z dodatkiem ziaren z mikrokorundu spiekaneego?

Powyższe uwagi i spostrzeżenia nie mają charakteru krytycznego, stanowią jedynie przyczynek do dyskusji w obszarze rozprawy.

5. Podsumowanie oceny pracy oraz wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska podejmuje istotną problematykę dotyczącą oceny efektywności procesu szlifowania wglębnego powierzchni walcowych wyrobów stosowanych w przemyśle lotniczym. Doktorant zaprezentował szeroki zakres badań zmierzający do doboru narzędzi oraz parametrów realizacji procesu obróbki zapewniających uzyskanie wymaganej jakości warstwy wierzchniej. Wykazał potencjał zastosowania technologii oraz wdrożył ją do praktyki przemysłowej.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Ordona **spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim**, przewidziane przez obowiązujące w tym względzie przepisy prawa (Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki - Dz. U. z 2017 r. poz. 1789; rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora - Dz. U. z 2018 r. poz. 261; ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce - Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 ze zm.). W związku z powyższym **stawiam wniosek o skierowanie** rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Ordona **do publicznej obrony**.

