

Prof. dr hab. inż. Mariusz Deja

---

L.dz. RD/MD/10/2026

Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów  
Zakład Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji

ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk  
mariusz.deja@pg.edu.pl  
tel.: +48 608-281-567

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

### mgr. inż. Tomasza Ordona

Promotor: dr hab. inż. Witold Habrat, prof. uczelni

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Sałata

---

Tytuł rozprawy doktorskiej:

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

---

Gdańsk, luty 2026

## 1. Uwagi wstępne

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo nr RM-530-08-01/2025 Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, prof. dr. hab. inż. Andrzeja Kawalca z dnia 26 listopada 2025 r. w sprawie wyznaczenia mojej osoby na recenzenta, oraz dołączony wydruk rozprawy doktorskiej. Dokumentacja została dostarczona do Kancelarii Politechniki Gdańskiej 15 grudnia 2025 r.

**Tytuł rozprawy doktorskiej:** Kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej w procesie szlifowania wgłębnego powierzchni walcowych wyrobów ze stali EI961 i AMS6308 po obróbce cieplno-chemicznej.

**Autor rozprawy doktorskiej:** mgr inż. Tomasz Ordon.

**Promotor:** dr hab. inż. Witold Habrat, prof. uczelni.

**Promotor pomocniczy:** dr inż. Marcin Sałata.

## 2. Tematyka rozprawy

Podjęta tematyka rozprawy doktorskiej jest ważna w aspekcie naukowym oraz przemysłowym. Obróbka komponentów mechanicznych, zwłaszcza elementów silników lotniczych musi być przeprowadzana zgodnie z najwyższymi standardami i normami, w tym branżowymi, w celu minimalizacji ryzyka awarii w trakcie eksploatacji. Złożoność procesu obróbki związana z wymaganiami dotyczącymi wysokiej twardości komponentów mechanicznych przy jednocześnie dużej ich elastyczności, determinuje zastosowanie określonych technologii pozwalających na uzyskanie odpowiednich powłok zabezpieczających przed ścieraniem, żarowytrzymałych oraz zapewniających minimalny opór powietrza opływającego dany element.

Po uzyskaniu powłoki należy przeprowadzić właściwą obróbkę w celu uzyskania zgodnych z wymaganiami konstrukcyjnymi charakterystyk geometrycznych powierzchni warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego (P-WW-PO) bez pogorszenia właściwości całej powłoki i materiału rodzimego. Złuszczanie obróbka końcowa decyduje o stanie technologicznej warstwy wierzchniej (TWW). Badania w zakresie obróbki utwardzonych powłok mogą przyczynić się do zoptymalizowania parametrów procesu szlifowania, lepszego doboru ściernic oraz ich kondycjonowania w celu uniknięcia wad i zmian strukturalnych w TWW. Przeprowadzone przez Doktoranta analizy i badania mogą bezpośrednio pomóc w spełnieniu wysokich wymagań wymiarowo kształtowych na powierzchniach walcowych części lotniczych poddanych procesom cieplno-chemicznym poprzez azotowanie lub nawęglanie.

Doktorant uwzględnił w swojej pracy doświadczenia innych badaczy z obszaru obróbki wykończeniowej utwardzonych powłok oraz oceny TWW. Dokładny przegląd literatury i ograniczone dane literaturowe, m.in. odnośnie kształtowania TWW w obróbce ubytkowej stali azotowanej lub nawęglanej stosowanej w technice lotniczej skłoniły go do realizacji badań w tym zakresie, co było całkowicie uzasadnione. Standardy lotnicze szczegółowo określają parametry TWW podlegające ocenie oraz ich wartości graniczne w celu zapewnienia odpowiedniej niezawodności i trwałości komponentów silnika lotniczego. Wytwarzanie części krytycznych, m.in. ze stali AMS6308 oraz EI961 z warstwami odpowiednio nawęglanymi i azotowanymi, jest jednym z najtrudniejszych i najbardziej kosztownych obszarów produkcji części lotniczych, co bezpośrednio przekłada się na proces produkcyjny, a w szczególności obróbkę skrawaniem jak i nadzorowanie procesu i kontrolę jakości.

Zgodnie z wytycznymi standardów lotniczych, Doktorant dokonał właściwej ilościowej i jakościowej oceny parametrów TWW związanych z mikrostrukturą WW, postacią i głębokością deformacji struktury, występowaniem tzw. białej warstwy, czy też mikrowad powierzchniowych. Opracowana przez Doktoranta metodyka i uzyskane wyniki eksperymentalne z zastosowaniem ściernic o różnej

charakterystyce, pozwoliły na wyznaczenie modeli matematycznych pozwalających określać w warunkach produkcyjnych zależności pomiędzy parametrami procesu, a stanem TWW. Dzięki temu możliwe jest skrócenie czasu przygotowania produkcji, ograniczenie liczby prób i błędów technologicznych, a co najważniejsze, zmniejszenie ryzyka wystąpienia niezgodności w częściach krytycznych. Przekłada się to na poprawę efektywności procesów wytwórczych, redukcję kosztów oraz podniesienie niezawodności gotowych elementów lotniczych. **Potwierdza to jednoznacznie wdrożeniowy, oprócz naukowego, charakter rozprawy.** Wyniki i metodyka badań Doktoranta mogą również posłużyć jako ogólne wytyczne do rozszerzonych analiz związanych z wytwarzaniem z materiałów trudnoobrabialnych elementów krytycznych w przemyśle lotniczym.

### 3. Charakterystyka rozprawy

Praca liczy 170 stron i składa się ze streszczenia w j. polskim i angielskim, wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów, wprowadzenia oraz dziewięciu rozdziałów głównych. Po syntetycznym wprowadzeniu do tematyki pracy, obejmującym problematykę wytwarzania komponentów w przemyśle lotniczym, zwłaszcza części krytycznych w silnikach przepływowych, Autor przedstawił w **rozdziale 1.** analizę stanu wiedzy z zakresu stali konstrukcyjnych stosowanych w technice lotniczej, możliwości poprawy właściwości eksploatacyjnych i kształtowania TWW. W **rozdziale 2.** Doktorant opisuje cel pracy wraz z hipotezą naukową wynikającą z analizy literatury i doświadczenia przemysłowego oraz zakres badań. **Rozdział 3.** obejmuje szczegółowy opis warunków badań doświadczalnych. **Rozdział 4.** zawiera wyniki z pomiarów sił skrawania wraz z ich modelowaniem. Badania w zakresie kształtowania topografii P-WW-PO przedstawione zostały w **rozdziale 5.** Zużycie ściernicy w aspekcie mechaniki szlifowania i stanu technologicznej WW Doktorant analizował w **rozdziale 6.** Wnioski końcowe dotyczące problematyki szlifowania wgłębnego na kształtowanie technologicznej WW zawiera **rozdział 7.** **Rozdział 8.** obejmuje aspekty wdrożeniowe wyników badań. Wykaz literatury przedstawiony w **rozdziale 9** liczy 72 pozycje literaturowe.

Istotne informacje w aspekcie realizowanego tematu zawarte zostały szczegółowo w następujących rozdziałach:

**Wprowadzenie** - z prawidłowym przedstawieniem problematyki badań, zasadności tematu oraz ogólnego zakresu pracy.

**Rozdział 1. Analiza stanu wiedzy** – scharakteryzowana w odniesieniu do stali konstrukcyjnych do pracy w podwyższonej temperaturze stosowanych w technice lotniczej oraz do możliwości poprawy właściwości eksploatacyjnych komponentów w aspekcie kształtowania TWW w obróbce ubytkowej poprzez szlifowanie. Szczegółowy przegląd literatury oraz identyfikacja problemów produkcyjnych pozwoliły Doktorantowi na wyciągnięcie właściwych wniosków będących podstawą do postawienia celu pracy i hipotezy naukowej oraz określenia problemów naukowych i szczegółowego zaplanowania zakresu badań.

**Rozdział 2. Cel i zakres pracy** – prawidłowo zdefiniowane, wynikające bezpośrednio z dogłębnego przeglądu literatury przedstawionego w Rozdziale 1. Doktorant założył istotny wpływ doboru ściernicy, parametrów szlifowania oraz kondycjonowania czynnej powierzchni ściernicy (CPS) na ograniczenie sił szlifowania i zmniejszenie ryzyka powstawania karbów, mikronierówności oraz uszkodzeń cieplnych w TWW wałków nawęglanych i azotowanych. Przedstawił hipotezę naukową związaną z możliwością minimalizacji niekorzystnych oddziaływań na TWW, w tym na topografię powierzchni, poprzez dobór rodzaju ściernicy oraz parametrów kondycjonowania i szlifowania.

**Rozdział 3. Warunki i metodyka badań doświadczalnych** – szczegółowo opisane w odniesieniu do obiektu badań doświadczalnych, w tym materiału obrabianego, zastosowanych narzędzi ściernych, parametrów procesu, planu badań oraz stanowiska badawczego wraz z aparaturą pomiarową.

**Rozdział 4. Analiza i modelowanie oddziaływań mechanicznych na kształtowanie warstwy wierzchniej** – z wynikami z pomiarów wartości składowych siły szlifowania dla obu analizowanych stali, wraz z analizą ukierunkowaną na określenie istotności wpływu parametrów szlifowania i kondycjonowania na uzyskane z pomiarów wyniki. W oparciu o analizę wariancji ANOVA wyznaczono odpowiednie modele matematyczne. Doktorant przedstawił również wnioski szczegółowe wynikające z analizy oddziaływań mechanicznych dla różnych ściernic i parametrów szlifowania.

**Rozdział 5. Badania w zakresie kształtowania stanu warstwy wierzchniej** – z wynikami z kształtowania topografii powierzchni dla obu analizowanych stali, wraz z analizą istotności wpływu parametrów szlifowania i kondycjonowania na uzyskane z pomiarów wartości parametrów chropowatości Sa, Sq i Sdq. W oparciu o analizę wariancji ANOVA wyznaczono odpowiednie modele matematyczne parametrów chropowatości Ra i Rz w funkcji istotnych parametrów wejściowych. Doktorant przedstawił również wnioski szczegółowe związane z uzyskanymi parametrami chropowatości Ra dla różnych ściernic i parametrów szlifowania. Analiza mikrostruktury TWW, kluczowa w aspekcie trwałości i niezawodności elementów lotniczych podczas eksploatacji, zawierała ocenę warstwy dyfuzyjnej, jednorodności jej budowy oraz identyfikację ewentualnych defektów takich jak mikropęknięcia i nieciągłości.

**Rozdział 6. Badania wpływu zużycia ściernic na mechanikę szlifowania i stan technologicznej warstwy wierzchniej** – z wynikami zmian składowych siły szlifowania i kształtowania parametrów chropowatości 2D i 3D w funkcji czasu dla obu analizowanych stali, wraz z analizą ukierunkowaną na zużycie promieniowe CPŚ. Doktorant przedstawił również zmiany morfologii mikrostruktury TWW uzyskanej w procesie szlifowania w odniesieniu do postępującego zużycia wybranych ściernic dla obu badanych stali.

**Rozdział 7. Podsumowanie i wnioski** – z przedstawieniem końcowych wniosków poznawczych poszerzających wiedzę na temat wpływu procesu szlifowania wgłębnego na kształtowanie TWW i utylitarnych związanych z poprawą efektywności produkcji i podniesieniem jakości części lotniczych oraz z określeniem dalszych kierunków badań.

**Rozdział 8. Wdrożenie wyników badań** – potwierdzające również aplikacyjny, oprócz naukowego, charakter rozprawy, zwłaszcza w aspekcie optymalizacji procesów obróbki części krytycznych.

**Rozdział 9. Bibliografia** – zawierająca 72 pozycje literaturowe głównie z czasopism naukowych, a także źródeł branżowych i stron internetowych, ściśle związane z realizowanym tematem.

#### **4. Ocena merytoryczna rozprawy**

Doktorant postawił na podstawie analizy literatury i badań przemysłowych cel naukowy pracy, którym było zbadanie i modelowanie wpływu procesu szlifowania wgłębnego powierzchni walcowych z uwzględnieniem oddziaływań mechanicznych, doboru ściernicy i parametrów jej kondycjonowania jak i samego procesu szlifowania oraz zużycia ściernicy na kształtowanie TWW wyrobów ze stali EI961 po azotowaniu i stali AMS6308 po nawęglaniu, stosowanych w technice lotniczej.

Celem wdrożeniowym pracy było opracowanie wytycznych niezbędnych do stworzenia technologii szlifowania wgłębnego części lotniczych wytwarzanych z obu gatunków stali, tak aby uniknąć czasochłonnego doboru parametrów obróbki w procesach technologicznych w przedsiębiorstwie i pozyskać wiedzę o prognozowaniu topografii powierzchni oraz mikrostruktury TWW.

**Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych i modelowych niewątpliwie upoważniają do stwierdzenia, że cel naukowy rozprawy został osiągnięty, a w konsekwencji również cel praktyczny związany z wdrożeniem wyników badań. Upoważniają również do przyjęcia postawionej hipotezy naukowej, oraz potwierdzają umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.**

**Pozytywnie i wysoko oceniam wiedzę teoretyczną Doktoranta w zakresie oceny i interpretacji oddziaływań mechanicznych, narzędzia i jego zużycia oraz parametrów procesu szlifowania na kształtowanie TWW, w tym struktury geometrycznej powierzchni i ewentualnych defektów, takich jak mikropęknięcia i nieciągłości.** Przeprowadzone badania i analizy potwierdziły wpływ ww. parametrów na mechanikę procesu szlifowania badanego materiału w określonych warunkach kinematyczno-technologicznych. Pozwoliło to opracowanie modeli matematycznych składowych siły skrawania i wybranych parametrów chropowatości w funkcji istotnych parametrów wejściowych.

Badania i analizy przeprowadzone przez Doktoranta były konieczne z uwagi na specyfikę obróbki wykończeniowej komponentów mechanicznych po obróbce cieplno-chemicznej decydującej o trwałości i niezawodności elementów lotniczych podczas eksploatacji. Morfologia mikrostruktury TWW oraz budowa warstwy dyfuzyjnej musi spełniać określone kryteria i być wolna od mikropęknięć i nieciągłości, pomimo zachodzących zmian w topografii CPŚ w czasie, wraz z postępującym zużyciem ściernic.

Rozprawa przyczynia się do lepszego poznania zjawisk w procesie szlifowania stali po azotowaniu i nawęglaniu, zwłaszcza wpływu rodzaju ściernicy i parametrów jej kondycjonowania jak i samego procesu szlifowania oraz zużycia narzędzia na kształtowanie TWW wyrobów stosowanych w technice lotniczej. Obróbka wykończeniowa zwykle decyduje o końcowej jakości przedmiotu obrabianego w zakresie dokładności wymiarowo-kształtowej, chropowatości powierzchni i integralności powierzchni. Wszystkie te elementy mają istotny wpływ na awaryjność silnika lotniczego, a co za tym idzie - na bezpieczeństwo lotu. Doktorant wykazał, że kształtowanie parametrów i struktury TWW zależy od wielu czynników i umiejętnie te zależności wykazał w rozprawie. Badania Doktoranta pozwoliły również na uzyskanie większej wydajności obróbki w przedsiębiorstwie Pratt & Whitney Rzeszów S.A.

Autor rozprawy przeprowadził wnikliwą analizę literatury kierunkowej z krytyczną dyskusją wyników badań w odniesieniu do dostępnych danych literaturowych.

**Rozprawa doktorska niewątpliwie stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego związanego z określeniem istotności wpływu szlifowania wgłębnego powierzchni walcowych z uwzględnieniem wielu czynników wejściowych możliwych do zastosowania w praktyce na kształtowanie TWW wyrobów ze stali EI961 po azotowaniu i stali AMS6308 po nawęglaniu, stosowanych w technice lotniczej.** Doktorant przyjął prawidłową metodykę badań z właściwym doбором stanowiska badawczego i aparatury pomiarowej wykorzystanej w badaniach eksperymentalnych. Analiza wyników eksperymentalnych i modelowych pozwoliła na wysunięcie prawidłowych wniosków końcowych.

## 5. Uwagi do pracy

- 5.1. W pracy badano m.in. wpływ poszczególnych czynników na zmiany chropowatości. Co wpłynęło na wybór parametrów chropowatości Ra i Rz oraz wg jakiej normy były wyznaczane? Czy Autor pracy rozważał uwzględnienie w analizach również innych parametrów chropowatości, które mogłyby pomóc w lepszej charakterystyce obrabianej powierzchni?
- 5.2. Dlaczego powierzchniowe parametry chropowatości, które zawierają więcej informacji o powierzchni od parametrów liniowych, nie zostały uwzględnione w modelowaniu?
- 5.3. Str. 154: „W strukturze nie zaobserwowano większych niejednorodności lub defektów” i str. 155: „ Nie stwierdzono również większych niejednorodności i pęknięć, co potwierdza brak niekorzystnych zjawisk cieplnych lub mechanicznych podczas końcowego szlifowania” – jaka jest graniczna wielkość niejednorodności i pęknięć, potwierdzająca niekorzystne zjawiska cieplne lub mechaniczne?

- 5.4. Czy Doktorant widzi możliwość zastosowania innych narzędzi lub technologii do obróbki analizowanych powierzchni, biorąc pod uwagę uzyskane wyniki i wymagania konstrukcyjne, jak również ciągły rozwój przemysłu narzędziowego?
- 5.5. Jaka była dokładność zastosowanej metody pomiaru topografii ściernicy i ile profili było mierzonych po określonym czasie obróbki?
- 5.6. Promieniowe zużycie ściernicy jest właściwym wskaźnikiem do określenia dynamiki zużycia ściernic, jednakże nie do końca daje odpowiedź o dominacji któregoś z mechanizmów wymienionych na stronie 152. Przy pomocy jakich metod pomiarowych można by lepiej scharakteryzować CPŚ pod kątem zmiany jej morfologii i geometrii ziaren ściernych w czasie?
- 5.7. Jakie zalecenia wskazałby Doktorant wytwórcy ściernic do obróbki analizowanych powierzchni? Czy dalsze ich modyfikacje, wykraczające poza ogólnodostępne komercyjne narzędzia, mogłyby wpłynąć korzystnie na efekty technologiczne?

## 6. Uwagi edytorskie

Praca napisana została bardzo starannie pod kątem edytorskim i językowym. Rysunki i wykresy są bardzo czytelne i przedstawiają wszystkie niezbędne opisy i informacje. Występują nieliczne błędy edytorskie i stylistyczne, np.:

- tytuł rozdziału 6. – jest „WPŁWU” powinno być „WPŁYWU”;
- w wykazie ważniejszych oznaczeń i skrótów, tylko niektóre definicje podane w j. angielskim tłumaczone są na język polski;
- 73<sup>9</sup> : jest „zagadnienie”, powinno być „zagadnienia”;
- 73<sup>15</sup> : jest „Uwzględniają”, powinno być „Uwzględniając”;
- spacja powinna być wstawiana przed i po znakiem równości, np. „ $v_f=0,15$  mm/min”, powinno być „ $v_f = 0,15$  mm/min”;
- 132<sub>10</sub> : jest „zastosowanie” powinno być „zastosowane”;
- wartości sił są większe, a nie wyższe, np. 157<sub>16</sub>.

## 7. Uwagi końcowe

Praca napisana została w sposób zrozumiały z uwypukleniem istotnych treści. Podane uwagi mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktoranta do dalszych badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych. Mam nadzieję, że będą pomocne przy przygotowywaniu artykułów do renomowanych czasopism naukowych. Uwagi te nie pomniejszają wysokiej wartości merytorycznej opiniowanej pracy.

## 8. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Praca stanowi oryginalny wkład do badań **szlifowania powierzchni walcowych z uwzględnieniem wielu czynników wejściowych możliwych do zastosowania w praktyce przemysłowej na kształtowanie TWW wyrobów ze stali E1961 po azotowaniu i stali AMS6308 po nawęglaniu, stosowanych często w technice lotniczej**. W ogólnej ocenie stwierdzam, że Pan mgr inż. Tomasz Ordon w pełni zrealizował zadanie badawcze będące przedmiotem rozprawy, której tematyka jest zbieżna z badaniami prowadzonymi na świecie oraz z aktualnymi wymaganiami i oczekiwaniami wielu gałęzi przemysłu maszynowego, nie tylko lotniczego.

Doktorant klarownie sformułował problemy i hipotezę badawczą oraz osiągnął cel naukowy i praktyczny pracy na drodze prawidłowo zaplanowanych i przeprowadzonych badań eksperymentalnych i modelowych. **W mojej opinii praca zasługuje na wyróżnienie z uwagi na jej nowatorski i użyteczny charakter oraz kompleksowy zakres badań i analiz. Tematyka pracy mieści się w obszarze dyscypliny naukowej *inżynieria mechaniczna*.**

Pozytywnie oceniam przedstawioną rozprawę doktorską i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Tomasza Orдона do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Na podstawie przedstawionej opinii i w świetle dostępnej i znanej mi literatury naukowej stwierdzam, że praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, przewidziane przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy (tj. art. 187 ust. 1-3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce) i **może stanowić podstawę do nadania jej Autorowi stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk *inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna*.**

Gdańsk, 08.02.2026 r.

.....  
/Mariusz Deja/