

Imię i nazwisko recenzenta:

dr hab. inż. Rafał Zybala

Dane adresowe:

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki

Al. Lotników 32/46,

02-668 Warszawa,

31.03.2026 r., Warszawa

(data i miejsce)

POLITECHNIKA POZNAŃSKA WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ I FIZYKI TECHNICZNEJ		
DNIA	13-04-2026	DNIA
WPŁYNEŁO		

DF-510/34/2026

Recenzja pracy doktorskiej

Pana mgr. inż. Grzegorza Kubickiego
(imię i nazwisko doktoranta / doktorantki)

pod tytułem „Opracowanie technologii wytwarzania powłok z faz MAX metodą aerosol cold spray”

przygotowanej pod kierunkiem:

Pana prof. dr. hab. Jarosława Jakubowicza
(promotora)

Pana dr. hab. inż. Dariusza Garbca
(promotora pomocniczego)

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Poznańskiej.

Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.)

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

- 1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
- 2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającej się o nadanie stopnia doktora;
- 3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

2.1 Tytuł rozprawy doktorskiej aktualność podjętego tematu

Recenzowana rozprawa doktorska podejmuje niezwykle aktualną i zarazem ambitną problematykę z zakresu inżynierii materiałowej, związaną z opracowaniem i zastosowaniem innowacyjnych materiałów ochronnych np. dla przemysłu lotniczego. Temat ten należy uznać za wysoce nowatorski i oryginalny, zarówno ze względu na unikatowe połączenie badań nad syntezą faz MAX (węgliki trójskładnikowe o rzadko spotykanych właściwościach) jak i rozwój autorskiej technologii ich nanoszenia z wykorzystaniem metody natryskiwania aerozolu na zimno (Aerosol Cold Spray). Praca wpisuje się w światowe trendy dążące do zwiększenia trwałości i efektywności eksploatacyjnej elementów maszyn, a jednocześnie proponuje własne, innowacyjne rozwiązanie technologiczne o realnym potencjale aplikacyjnym i komercyjnym. Zastosowana zmodyfikowana technologia FAST/SPS należy do niekonwencjonalnych technik spiekania (a w tym przypadku także syntezy) materiałów proszkowych i pozwala wytwarzać materiały o unikatowych właściwościach.

2.2 Charakterystyka i ocena rozprawy - ocena metodyczna (ocena układu rozprawy doktorskiej, ocena zastosowanego piśmiennictwa)

W swojej rozprawie doktorskiej Pan mgr inż. Grzegorz Kubicki podjął temat opracowania technologii wytwarzania powłok z faz MAX: Ti_2AlC , Cr_2AlC oraz Ti_3AlC_2 metodą natryskiwania aerozolu na zimno oraz przeprowadził kompleksową ocenę ich właściwości eksploatacyjnych. Praca obejmowała także przygotowanie materiałów wyjściowych, dobór parametrów procesu i sprawdzenie wpływu obróbki poprocesowej na mikrostrukturę i własności wytworzonych powłok.

Przewód doktorski został otwarty w dyscyplinie „Inżynieria Materiałowa” a recenzowana rozprawa doskonale mieści się w tej dyscyplinie. Układ rozprawy doktorskiej ma prawidłową budowę, biorąc pod uwagę przedstawienie klasycznego układu od wstępu i analizy stanu techniki poprzez zaprezentowanie celu pracy oraz opisu części praktycznej z uwzględnieniem obszernego zakresu prac technologicznych i badawczych. Rozprawa podzielona jest na 11 części, w których przedstawione zostały: abstrakt, streszczenie, dorobek naukowy Autora, 7 części dotyczących opisu części teoretycznej i praktycznej pracy oraz literatury.

We wstępie oraz w opisie opracowanej technologii Autor w skrótowny, ale metodyczny sposób przedstawia kluczowe zagadnienia związane z podjętym problemem technologiczno-badawczym. Opisuje aktualne możliwości i potrzeby technologiczne w odniesieniu do nowoczesnych materiałów faz MAX, ich zastosowań oraz technologii wytwarzania. Autor

słusznie zauważa, że mimo wielu technik wytwarzania faz MAX oraz powłok z wykorzystaniem technik natryskiwania, w przedstawionej pracy uzyskano jako pierwsze udane osadzanie powłok faz MAX przy użyciu techniki opartej na niskociśnieniowym natryskiwaniu na zimno.

Jednym z kluczowych etapów prac badawczych był właściwy dobór warunków syntezy materiałów. Autor celnie zwraca uwagę na wystąpienie reakcji egzotermicznej w mieszaninach z tytanem, prawdopodobnie odpowiedzialnej za tworzenie się faz TiC i Ti₂AlC. Doktorant przedstawia wyniki mechanicznej syntezy mieszanin tytanu, aluminium i grafitu, z których otrzymał proszek zawierający fazy Ti₂AlC i TiC, natomiast synteza układu Cr-Al-C doprowadziła do powstania roztworu stałego Al i C w chromie. Jednocześnie zastosowanie bezciśnieniowego spiekania iskrowo-plazmowego, jako kolejnego etapu syntezy, umożliwiło uzyskanie materiałów z przewagą faz MAX, przy bardzo wysokiej zawartości tych faz, sięgającej co najmniej 98% masowych. W dalszych etapach doktorant zastosował metodę natryskiwania aerozolu na zimno, co pozwoliło na wytworzenie powłok ze wszystkich otrzymanych proszków. Należy zaznaczyć, że jest to pierwsze doniesienie naukowe wskazujące na możliwość zastosowania tej techniki do osadzania takich materiałów a uzyskane w pracy powłoki zachowały skład fazowy, wykazały korzystny stopień zagęszczenia i w zdecydowanej większości próbek nie zawierały pęknięć poprzecznych. Kolejnym etapem prac technologicznych było zastosowanie przez Autora obróbki poprocesowej w postaci spiekania swobodnego oraz spiekania iskrowo-plazmowego, które doprowadziło do zniwelowania nieciągłości między cząstkami w powłokach Ti₂AlC i Cr₂AlC, a także do poprawy ich własności mechanicznych. Jednocześnie procesy te powodowały negatywną dyfuzję aluminium do podłoża, przy czym efekt ten jest mniej nasilony w przypadku techniki SPS ze względu na znacznie krótszy czas procesu. W przypadku powłok Ti₃AlC₂ obróbka swobodna sprzyjała powstawaniu pęknięć, natomiast zastosowanie techniki SPS powodowało jedynie nieznaczny wzrost porowatości.

W rozdziale dotyczącym wyników badań materiałowych, przedstawiono w sposób esencjonalny najważniejsze metody badawcze począwszy metod analizy składu i mikrostruktury, właściwości mechanicznych, badan odporności na utlenianie i korozję. Przeprowadzone przez Doktoranta badania przyczepności wykazały wartości przekraczające 40–60 MPa dla wszystkich powłok, a wyniki testów zarysowania wskazały na poprawę odporności na pękanie adhezyjne i kohezyjne w powłokach Ti₂AlC i Cr₂AlC po spiekaniu. Wyjątek stanowiły powłoki Cr₂AlC spiekane swobodnie, które ulegały niekorzystnej przemianie fazowej wskutek intensywnej dyfuzji aluminium. Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant wskazał, że spełnił założenia celów pracy i opracował technologię wytwarzania, natryskiwania oraz obróbki poprocesowej powłok z faz MAX, które cechowały się dobrą przyczepnością i pozwalały na poprawę odporności powierzchni na zużycie oraz korozję.

Przedstawił także plan dalszych badań, które powinny obejmować optymalizację rozkładu wielkości i morfologii materiału wyjściowego, zastosowanie innych typów faz MAX oraz wykorzystanie dyfuzji aluminium podczas obróbki poprocesowej w celu tworzenia struktur wielowarstwowych.

2.3 Najważniejsze uwagi ogólne i szczegółowe

Zaprezentowana zarówno w opisowym wstępie teoretycznym jak części eksperymentalnej koncepcja dotycząca celu pracy oraz badań została sformułowana przez Doktoranta poprawnie. Realizację obszernego zakresu syntez materiałów, faz MAX, przeprowadzonych prac technologicznych oraz badań oceniam bardzo pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest klarowna i zawiera szereg wartościowych wyników i informacji (potwierdza to także szereg 6 publikacji i 3 zgłoszeń patentowych odnoszących się do wyników, w których doktorant jest współautorem). Doceniam celnie przyjęty zakres eksperymentu oraz dużą liczbę przeprowadzonych badań, także na etapie mechanicznej syntezy jak i optymalizacji procesów spiekania czy otrzymywania powłok. Sposób zaprezentowania wyników, przyjęty naukowy styl analiz oraz przedstawione wnioski świadczą o tym, że rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.

Rozprawa napisana jest dobrze z zastosowaniem właściwej terminologii a niektóre przedstawione wyniki ukazały się w czasopismach o zasięgu międzynarodowym z zakresu inżynierii materiałowej. Jednocześnie Autorowi nie udało się uniknąć zarówno błędów redakcyjnych oraz merytorycznych, a w częściach teoretycznej i badawczej sprawiających wręcz wrażenie upraszczania lub stosowania skrótów myślowych np.:

1. W części teoretycznej Autor wielokrotnie odnosi się do prac wykonanych przez „zespół z uniwersytetu”, nie podając jednak nazwisk autorów badań, co odbiega od powszechnie przyjętych standardów cytowania prac naukowych. Zdarzają się jednak w pracy również poprawne odniesienia, na przykład w podrozdziale 2.1.
2. Na stronie 21 autor wskazuje między innymi, że ze względu na pole powierzchni fazy MAX mogą być stosowane jako komponenty do produkcji baterii. Prawdopodobnie chodzi jednak o dużą powierzchnię właściwą, a nie o całkowite pole powierzchni.
3. Niska czytelność schematów i rysunków utrudnia poprawne zrozumienie treści pracy. Na rysunku 6 Autor zaprezentował ogólny schemat procesu natryskiwania cieplnego. Spośród znanych mi opracowań dotyczących tej metody, przedstawiony schemat należy do najmniej

udanych, a w mojej ocenie zawiera również elementy niepoprawne. Niektóre sformułowania w pracy mają charakter bardzo ogólny i w celu lepszego oddania naukowego charakteru wymagałyby zdecydowanego doprecyzowania, szczególnie w części teoretycznej.

4. Niejednolite nazewnictwo, np. dotyczące omawianych metod przyrostowych, często miesza wersję polską z angielską – uproszczenie do jednej wybranej formy (np. polskiej) zdecydowanie poprawiłoby czytelność przekazu (dotyczy to także tytułu pracy).
5. Na stronie 35 Autor podaje, że ciepło generowane jest w miejscach zmiany rezystywności materiału, odwołując się chwilę wcześniej do publikacji, w której spiekanie iskrowo-plazmowe wskazano jako potencjalnie korzystną metodę obróbki poprocesowej. Czy rzeczywiście hydroksyapatyt omawiany w publikacji wykazuje znaczące zmiany rezystywności w trakcie spiekania?
6. Autor w rozdziale Cel Rozprawy Doktorskiej podaje, że „*celem rozprawy było opracowanie technologii wytwarzania powłok z faz MAX metodą natryskiwania aerozolu na zimno*” i już w następnym zdaniu przechodzi do stwierdzenia, że „*w tym celu, opracowana została technologia wytwarzania faz MAX z proszków elementarnych metodą mechanicznej syntezy oraz spiekania iskrowo-plazmowego*” – cel jest dobrze zdefiniowany, jednak kolejny raz zauważalne są nadmierne skróty myślowe.
7. Na stronach 42 i 43 Autor opisuje proces spiekania materiałów i dalszego przygotowania proszków po rozdrobnieniu. Czy na pewno zachodzący w czasie wygrzewania próbek bez ciśnienia w prasie SPS powinien być określany spiekaniem czy reakcją/syntezą/drugim etapem syntezy po wstępnym procesie mechanicznej syntezy?
8. Czy Autor rozważał możliwość dalszej optymalizacji dodatków stechiometrycznych, zwłaszcza że zastosowane 10% mas. nadmiaru aluminium i 10% mas. niedomiaru grafitu wydają się bardzo duże? Czy Autor przewiduje w przyszłości optymalizację tych wartości w celu ograniczenia strat materiałowych i poprawy kontroli składu?
9. Autor podaje na str. 53, że zmiany temperatury w czasie spiekania mieszaniny po procesie mechanicznej syntezy (rys. 24b) potwierdzają wyeliminowanie reakcji egzotermicznej z procesu spiekania SPS. Czym zatem jest nieopisana nagła zmiana temperatury widoczna na rys. 24b w okolicach 350–400°C? Czy może wynikać z innego procesu zachodzącego podczas nagrzewania np. zmian oporu kontaktowego, intensywnego zagęszczania lub artefaktu pomiarowego?
10. Fotografie próbek zaprezentowane m.in. na stronach 54 i 83 są bardzo niskiej jakości. Na poziomie rozprawy doktorskiej i przy obecnych możliwościach technicznych oczekiwane jest znacznie bardziej staranne podejście do dokumentacji wizualnej materiałów.

11. Na stronie 87, w tabeli 16, pojawiło się wiele drobnych błędów edytorskich, które znacząco utrudniają czytelną interpretację wyników. W przyszłości wymagana jest od Autora większa staranność redakcyjna.
12. Stosowanie cytowań stron www powinno zawierać więcej danych – przynajmniej datę dostępu (np. pierwsze 2 pozycje bibliografii).


3. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Grzegorza Kubickiego dotyczy opracowania technologii wytwarzania powłok z faz MAX: Cr_2AlC , Ti_2AlC oraz Ti_3AlC_2 z proszków elementarnych tytanu, chromu, aluminium i grafitu metodą aerosol cold spray, przy czym uzyskano czystość fazową powyżej 98%, co stanowi osiągnięcie innowacyjne.

Podjęty w rozprawie temat jest istotny i wnosi znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa. Doktorant wykazał się umiejętnością planowania i prowadzenia badań oraz merytorycznej analizy uzyskanych wyników.

Uważam, że recenzowana rozprawa prezentuje szeroką wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa, ponieważ zawiera element nowości polegający na twórczym zastosowaniu procesów mechanicznej syntezy, spiekania techniką SPS oraz niskociśnieniowego natryskiwania na zimno, co wnosi wkład do dyskusji nad rozwojem techniki wytwarzania materiałów i powłok z faz MAX. Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań są nowe i oryginalne. Chciałbym jednoznacznie stwierdzić, że wszystkie wskazane przeze mnie w niniejszej recenzji błędy, uwagi i niedociągnięcia nie zmieniają mojego pozytywnego odbioru pracy, a mają na celu poprawę warsztatu naukowego Doktoranta.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.


(podpis recenzenta)