

Kraków, 29.12.2020

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Petrusa pt. „Nowe kompozyty na osnowie węgliku krzemu z dodatkiem węglików tytanu w formie kryształów 2D”

Przedstawiona do recenzji praca wykonana została na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Andrzej Olszyna, natomiast promotorem pomocniczym dr inż. Jarosław Woźniak.

W ramach pracy doktorskiej opracowano innowacyjne kompozyty oparte na osnowie z węgliku krzemu z umocnieniami w postaci struktur 2D – węglików tytanu. Tematyka pracy wpisuje się w wieloletnie badania nad poprawą odporności na kruche pękanie tworzyw węgliku krzemu. Ten materiał, doskonały pod wieloma względami, posiada podstawową wadę, jaką jest niska odporność na kruche pękanie. Należy podkreślić, że w recenzowanej pracy po raz pierwszy do umocnienia kompozytów węgliku krzemu zastosowano fazy MAXene – węgliki tytanu, w formie kryształów 2D.

Wprowadzenie

Tytułem wstępu do recenzji należy nadmienić, że węgiel krzemu, choć znany od ponad stu lat, nie traci na popularności i znajduje coraz to nowe zastosowania. Materiał ten jest bardzo szeroko stosowany zarówno w formie proszków, warstw jak i kształtek. Węgiel krzemu odznacza się wysoką twardością, która odpowiada za jego wysoką odporność na ścieranie i dlatego jest powszechnie stosowany jako proszki ściernie i polerskie, a wytwarzane z niego kształtki stosowane są jako elementy odporne na ścieranie np. dysze do piaskowania czy uszczelnienia cierne. Szczególne zastosowanie znalazł węgiel krzemu w astronomii (warstwy lustrzane w teleskopach), w elektronice (niebieskie diody LED) a także w energetyce jądrowej (warstwy w cząstkach paliwa TRISO; warstwy w zbiornikach na odpady nuklearne i reaktorach do syntez jądrowych). Od kształtek oprócz wysokiej twardości i odporności na erozję oraz korozję, wymaga się odpowiednich parametrów mechanicznych, przede wszystkim zadowalającej odporności na kruche pękanie i wytrzymałości. Polikryształy wytwarzane z obu węglików diamentopodobnych tj. SiC i B₄C wykazują niską odporność na kruche pękanie. Krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężeń tych tworzyw waha się od 2 do 4 MPa·m^{0,5}. Zwiększenie odporności na kruche pękanie jest możliwe poprzez wytwarzanie kompozytów, w których osnowę stanowi jeden z węglików. W tym miejscu należy zaznaczyć, że węgiel krzemu zaliczany jest do materiałów trudnosiekalnych. Wytworzenie gęstych polikryształów jak i kompozytów z osnową SiC wymaga zastosowania aktywatorów spiekania. Powszechnie stosowane są dwie grupy aktywatorów: bor+węgiel i/lub dodatki tlenkowe. Konieczność stosowania dodatków aktywujących zagęszczanie, utrudnia otrzymanie kompozytów i istotnie ogranicza ilość materiałów, które można zastosować jako wtrącenia w kompozytach. Ponadto dodatki umacniające czy wzmacniające nie powinny pogarszać cennych właściwości

osnowy, co jeszcze bardziej zawęża ich ilość. Obiecującą grupą związków, które mogą być wykorzystywane jako umocnienia osnowy kompozytów CMC, w tym i SiC, są kryształy warstwowe. Dobrze poznany jest wpływ cząstek grafitu, który pełni rolę aktywatora spiekania i umocnienia SiC. Również pozytywne rezultaty w zwiększeniu parametrów takich jak: twardość, wytrzymałość i odporność na kruche pękanie, można uzyskać wówczas gdy do osnowy tlenkowej wprowadzane są cząstki wielowarstwowego grafenu płatkowego lub jego pochodnych. Podobne badania prowadzono również na kompozytach na bazie SiC, jednak są one niekompletne. W ostatnich latach szeroko prowadzone są badania nad dwuwymiarowymi kryształami (struktury 2D), tzw. fazami MAXene. Fazy te wyodrębnia się podczas skomplikowanej preparatyki wyjściowych struktur warstwowych tzw. faz MAX. Fazy MAXene to m.in. kryształy warstwowe 2D węglików tytanu Ti_3C_2 i Ti_2C . Można zatem podkreślić, że zastosowanie w recenzowanej pracy, w/w węglików tytanu do umocnienia kompozytów SiC, jest jak najbardziej zasadne, przede wszystkim ze względu na ich unikatową budowę krystaliczną i oraz fakt, że nie powinny istotnie zmniejszać cennych właściwości osnowy. Temat badawczy jest zatem aktualny, ważny i ciekawy, tak w kontekście badań czysto poznawczych jak i możliwych potencjalnych zastosowań otrzymanych kompozytów.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Głównymi celami rozprawy Pana magistra Mateusza Petrusa były:

1) określenie wpływu różnych odmian alotropowych węgla (aktywatora spiekania) na skład fazowy, spiekalność, mikrostrukturę i właściwości mechaniczne spieków SiC otrzymanych metodą spiekania wspomaganego polem elektrycznym (SPS)

2) opracowanie metody wytwarzania kompozytów ziarnistych SiC - fazy MAXene a także określenie wpływu dodatku na parametry mechaniczne kompozytów.

Autor sformułował również hipotezy badawcze i stwierdził, że:

- morfologia użytych węgli ma istotny wpływ na mikrostrukturę i właściwości spieków SiC,
- grafen może być jednocześnie aktywatorem spiekania i umocnieniem kompozytów,
- istnieje optymalny dodatek węglików tytanu zapewniający najlepsze parametry mechaniczne kompozytów.

Zakres badań w pierwszej części obejmował charakterystykę użytych surowców; wytworzenie serii mieszanin węgla krzemu z aktywatorami: borem i różnymi formami węgla (wielowarstwowym grafenem płatkowym, czernią węglową i grafitem syntetycznym); spiekanie mieszanin oraz analizę gęstości, mikrostruktury i właściwości mechanicznych spieków w celu wyodrębnienia najlepszego składu. W drugiej części Autor wytworzył kompozyty na osnowie węgla krzemu z dodatkiem cząstek faz MAXene – Ti_2C i Ti_3C_2 a następnie wyznaczył ich właściwości mechaniczne.

Recenzowana praca napisana jest w języku polskim i obejmuje 106 stron maszynopisu. Podzielona jest na rozdziały wg ogólnie przyjętego schematu dla tego typu prac. Zawiera streszczenie, następnie część literaturową, która obejmuje wprowadzenie, przegląd literatury tematu, opis techniki SPS i podsumowanie stanu wiedzy. Po przeglądzie literatury Autor przedstawił cel, hipotezy badawcze i zakres pracy. W kolejnej części tj. części doświadczalnej Autor opisał technikę otrzymywania badanych materiałów tj. technikę SPS, przedstawił preparatykę otrzymywania spieków SiC i kompozytów na bazie SiC, zastosowane metody badawcze, wyniki badań i ich dyskusję, podsumowanie i wnioski oraz spis literatury. Część teoretyczną Doktorant zawarł na 27 stronach co stanowi około 30% rozprawy. Część opisująca metodykę oraz wyniki

obejmuje 58 stron co stanowi około 50% rozprawy. Pozostałą część pracy stanowi obszerny spis literatury obejmujący 178 pozycji literaturowych. Cytowana literatura jest dobrze dobrana i prawidłowo wykorzystana. Podsumowanie i wnioski końcowe zajmują 3 strony.

Merytoryczna ocena rozprawy

W części literaturowej Autor scharakteryzował osnowę kompozytów czyli węglík krzemu. Charakterystyka obejmuje budowę strukturalną i podstawowe właściwości SiC. Wg recenzenta przedstawione dane bardzo dobrze i nieprzesadnie opisują ten unikatowy materiał, i wprowadzają czytelnika w tematykę pracy. Następnie Autor opisał najnowsze dane nt. kompozytów ziarnistych z osnową z SiC. Okazuje się jednak, że tytuł rozdziału jest przewrotny, bo oprócz opisu kompozytów na bazie SiC można w nim znaleźć dane dotyczące kompozytów z osnową korundową i z azotku krzemu z wtrąceniami grafenowymi lub wtrąceniami pochodnych grafenu. Kolejne rozdziały wprowadzają czytelnika w fazy MAXene – kryształy warstwowe. Ten opis, pomimo faktu, że jest skondensowany do 5 stron bardzo dobrze oddaje charakterystykę i właściwości tych szczególnych struktur. Następny rozdział to przegląd dostępnej literatury poświęconej kompozytom o osnowie polimerowej, metalicznej i ceramicznej z wtrąceniami, stosowanych przez Autora węglików tytanu - faz MAXene. W przeglądzie literatury nie mogło zabraknąć rozdziału opisującego używaną w pracy technikę spiekania tj. technikę SPS (spiekania wspomaganego polem elektrycznym). Przegląd literatury Doktorant kończy podsumowaniem stanu wiedzy, w którym wykazuje zasadność i ważkość podjętego tematu badań.

Po przeglądzie literatury tematu Autor sformułował cele pracy i hipotezy badawcze oraz przedstawił zakres pracy.

W kolejnych rozdziałach zawarte są badania własne Autora, stanowiące podstawę recenzowanej pracy. W pierwszych rozdziałach opisana jest preparatyka polikryształów SiC, spiekanych z dodatkami stałej ilości boru 0,3% mas. i różnych ilości, różnych odmian alotropowych węgla a także preparatyka wytwarzania kompozytów SiC – fazy MAXene. Zdaniem recenzenta tytuł rozdziału *Metoda wytwarzania kompozytów na osnowie węglíka krzemu nie oddaje jego zawartości*, gdyż w pierwszym podrozdziale opisana jest metoda wytwarzania polikryształów osnowy – SiC, a dopiero w drugim metoda otrzymywania kompozytów. Po opisie preparatyki próbek do badań, scharakteryzowane zostały metody badawcze użyte w pracy. Kolejny rozdział to wnikliwa charakterystyka substratów użytych do wytworzenia zarówno polikryształów SiC jak i kompozytów na osnowie SiC. Następnie Pan Mateusz Petrus omówił uzyskane wyniki z pierwszej części badań, które poświęcone były wyborowi najlepszej odmiany alotropowej użytego węgla i jej ilości jako aktywatora spiekania węglíka krzemu. Wybór optymalnego dodatku węgla Autor oparł na pomiarach gęstości spieków, na analizie ich mikrostruktury oraz na pomiarach właściwości mechanicznych takich jak: twardość, moduł Younga i odporność na kruche pękanie. Dodatkowo Doktorant poparł swoje przemyślenia ilościową analizą mikrostruktury uzyskanych spieków. Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant zauważył, że obecność wydłużonych ziaren w spiekach SiC koreluje z występowaniem odmiany heksagonalnej węglíka krzemu, pomimo, że wyjściowy proszek SiC był odmiany regularnej. Ponadto, zdaniem Autora, w przypadku grafitu płatkowego istnieją warunki, aktywujące przemianę polimorficzną $\beta\text{SiC} \rightarrow \alpha\text{SiC}$ jak również warunki inhibujące tę przemianę. Warunki te zależą od ilości dodatku grafitu. Ta obserwacja jest ciekawa, i tu zgadzam się ze zdaniem Autora pracy, że wymaga jeszcze pogłębionych analiz i badań. W

podsumowaniu rozdziału Doktorant dokonuje, wg recenzenta, nieoczywistego wyboru optymalnego dodatku węgla, którym jest grafit syntetyczny. O wyborze tej odmiany węgla decydują również względy ekonomiczne i powszechność grafitu.

W następnych rozdziałach pracy, Autor przedstawił wyniki badań kompozytów na bazie SiC z wtrąceniami cząstek faz MAXene, węglików tytanu Ti_2C i Ti_3C_2 . W pierwszym podrozdziale zaprezentował wyniki badań wpływu ilości wprowadzonych kryształów 2D na gęstość i właściwości mechaniczne wytworzonych kompozytów. Następnie przedstawił bardzo dokładną analizę mikrostruktury kompozytów połączoną z równie wnikliwą analizą składu fazowego i chemicznego. Analizy te zostały przeprowadzone w oparciu o nowoczesne techniki pomiarowe takie jak: mikroskopia skaningowa SEM, mikroskopia transmisyjna połączona z analizą dyfrakcji elektronów i analizą składu pierwiastkowego HAADF, wysokorozdzielcza mikroskopia transmisyjna HRTEM. Dzięki zastosowaniu tych zaawansowanych metod badawczych Doktorant mógł poprowadzić właściwie dyskusję wyników i wykazać, że w trakcie spiekania fazy MAXene ulegają rozkładowi. W mikrostrukturze kompozytów Doktorant zidentyfikował przede wszystkim pseudomorfozy węglowe będące pozostałościami po fazach MAXene. Dodatkowo stwierdził, że powstający z rozkładu faz MAXene tlenek tytanu może aktywować zagęszczanie osnowy SiC. Te wnioski, jak wykazał Autor, pozostają w zgodzie z dostępną na ten temat literaturą a tym samym rzucają nowe światło na spiekanie kompozytów na osnowie SiC z dodatkami węglików tytanu w formie kryształów o strukturze 2D. Zdaniem recenzenta jest to najważniejsze osiągnięcie rozprawy, czego potwierdzeniem są cztery prace autorstwa lub współautorstwa Doktoranta, które zostały opublikowane w czasopiśmie z listy JCR – *Ceramics International*. Praca zakończona jest podsumowaniem i wnioskami opisowymi jakie zostały wyciągnięte na podstawie otrzymanych wyników.

Reasumując, Autor uzyskał ciekawe wyniki, które przedstawił w sposób właściwy dla nauk technicznych i poprawny. Przygotowanie dużej liczby materiałów i wykorzystanie trudnych technik laboratoryjnych (np. w celu wyodrębnienia faz MAXene), jak i metod badawczych świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do pracy badawczej. Należy podkreślić również, że wyniki zostały właściwie opisane z jednoczesnym ich wyjaśnieniem na podstawie dostępnej w literaturze wiedzy.

Po przeczytaniu pracy rodzą się pytania, które powinny być głębiej przedyskutowane. Pytania dotyczą zarówno drobnych uwag merytorycznych, używanych pojęć, jasności stylu jak i strony technicznej pracy. Pragnę zaznaczyć, że wszystkie mają charakter dyskusyjny.

1. Strona 20. Zdanie z pracy „*Pewna poprawa wysokiej kruchości węglika krzemu była możliwa dzięki rozwojowi technologii spiekania, od spiekania pod ciśnieniem....*” sugeruje wzrost kruchości SiC, czyli pogorszenie odporności na kruche pękanie. Zdaniem recenzenta Doktorant prawdopodobnie zamiast sformułowania odporność na kruche pękanie użył sformułowania kruchość, zastosował tzw. skrót myślowy. Niemniej jednak zastanawiam się jak rozwój technologii (technik) spiekania spowodował poprawę odporności na kruche pękanie tworzyw na bazie SiC ?

2. W pracy występuje sformułowanie *dotatki spiekalnicze* (np. str. 15, 17 itd.). Moim zdaniem to sformułowanie jest adekwatne dla dodatków stosowanych do produkcji spieku rudnego w procesie wielopieczowym. Nie spotkałam się z tym określeniem, w odniesieniu do dodatków pomagających w wytworzeniu gęstych spieków. Według mnie powszechnie przyjęte określenia

to: dodatki do spiekania czy aktywatory spiekania. Te określenia zbliżone są do stosowanych w języku angielskim takich jak: sintering additives, sintering aids.

3. Strona 41, rysunek 14. Autor optymalizował spiekanie osnowy SiC za pomocą różnych odmian alotropowych węgla, którym nadał symbole od C1 do C3. Na rysunku występuje natomiast oznaczenie węgla C4, czy była to inna odmiana węgla od stosowanych w celu optymalizacji spiekania ?

4. Strona 49. Tytuł rozdziału brzmi: *Charakteryzacja substratów wyjściowych*. Niestety z określeniem charakteryzacja, nie mogę się zgodzić. Moim zdaniem powinno być charakterystyka, która z definicji jest opisem cech charakteryzujących kogoś lub coś. Charakteryzacja to określenie używane w literaturze – proces tworzenia postaci, lub w teatrze, gdzie prowadzi do uwydatniania na twarzy i w wyglądzie cech granej przez aktora postaci. Chcę dodać, że nie widzę tu złej woli Autora gdyż często potocznie posługujemy się tym określeniem, często też program do edycji tekstu sam zmienia znaczenie wyrazów. Nawet wielokrotne przeczytanie napisanego tekstu nie pomaga w znalezieniu tego typu błędów, dlatego, że Autor, mówiąc potocznie, *czyta z pamięci*.

5. Strona np. 58. Rysunki (wykresy) przedstawiające wpływ ilości dodatku różnych odmian węgla na gęstość i właściwości mechaniczne spieków SiC, moim zdaniem, byłyby czytelniejsze gdyby oś X rozpoczynała się od zera. Wówczas znaczniki dla najmniejszego dodatku węgla nie byłyby na osi Y.

6. Strony np. 61 i 63, obrazy mikrostruktur SEM. Zastanawiam się dlaczego Doktorant nie przeprowadził analizy mikrostruktury na zgładach metalograficznych poddanych trawieniu w celu uwidocznienia granic międzyziarnowych ? Zgłady pozwalają lepiej ocenić i scharakteryzować wielkość oraz kształt ziaren. Kolejne moje pytanie związane z obrazami mikrostruktur dotyczy powiększeń zdjęć SEM, czy nie lepiej byłoby zestawiać zdjęcia wykonane pod tym samym lub zbliżonym powiększeniem ? Zestawienie zdjęć pod różnymi powiększeniami utrudnia porównanie mikrostruktur spieków z różną ilością i różnymi odmianami węgla.

7. Strony 49-67. Moje pierwsze i jednocześnie największe doświadczenia naukowe związane są ze spiekaniem węgla krzemu z dodatkami boru i węgla, dlatego najwięcej uwag i pytań do Doktoranta powstało podczas czytania rozdziałów dotyczących optymalizacji spiekania SiC.

- Zaczę od charakterystyki użytego do badań proszku β SiC. Autor rozprawy charakteryzując proszek SiC, podał większość parametrów poza ilością podstawowego zanieczyszczenia - tlenu. Co sprawiło, że ten parametr został pominięty ? Z badań nad spiekaniem SiC wiadomo, że na podstawie ilości tlenu można obliczyć ilość krzemionki a na tej podstawie ilość węgla, niezbędną do pełnej redukcji warstw krzemionkowych. Te obliczenia pomagają wyznaczyć zakres dodatku węgla. Ponieważ działanie węgla rozciąga się na cały zakres temperatur spiekania i nie dotyczy tylko redukcji warstw SiO₂, dodatek ten jest zwykle dwukrotnie większy od niezbędnego do redukcji SiO₂. Ponadto wydzielения nadmiarowego węgla mogą skutecznie ograniczać rozrost ziaren w końcowych etapach spiekania SiC.
- Kolejna moja uwaga dotyczy wyboru odmian węgla – aktywatorów spiekania SiC. Dlaczego Autor zastosował takie odmiany węgla jak: wielowarstwowy grafen płatkowy i grafit syntetyczny, skoro w podsumowaniu stwierdził, że specyficzna budowa strukturalna grafitu i grafenu utrudnia homogenizację proszków, sprzyja aglomeracji cząstek obu odmian węgla. Niejednorodności w mieszaninach proszkowych przekładają się na

nierównomierne zagęszczanie a w efekcie końcowym na niejednorodną mikrostrukturę spieków. Ponadto wieloletnie badania nad spiekaniem SiC wykazały, że najlepszymi dodatkami węgla są jego reaktywne, drobnoziarniste odmiany takie jak: sadza lub węgiel aktywny. Jednak najlepszym prekursorem węgla są żywice np. żywice fenolowo-formaldehydowe typu Nowolak. Podczas homogenizacji mieszanin wyjściowych pokrywają równomierną warstwą cząstki SiC, ułatwiają formowanie próbek surowych a w trakcie spiekania, po pirolizie, pozostawiają kilkadziesiąt % masowych węgla. Główną rolę węgla podczas spiekania SiC jest redukcja pasywujących warstw krzemionkowych występujących na ziarnach węgla. Zatem wprowadzenie do układu węgla w postaci żywic typu Nowolak sprzyja lepszej homogenizacji mieszanin wyjściowych i pełnej redukcji SiO₂, co przekłada się na jednorodne zagęszczanie podczas spiekania i na jednorodną mikrostrukturę po spiekaniu. Zastanawiam się jaki były powody, że Doktorant nie skorzystał z tych doświadczeń i nie przeanalizował spiekania SiC z w/w odmianami węgla lub jego prekursorami ?

- Moim zdaniem wybór grafitu syntetycznego jest wyborem nieoczywistym. Wszystkie odmiany alotropowe węgla jakich Autor użył do aktywacji spiekania dały zbliżone rezultaty. Jednak, jak pokazały badania, spiekami o najwyższej gęstości są spieki z dodatkiem czerni węglowej C2, a pod względem najwyższej odporności na kruche pękanie spieki z dodatkiem wielowarstwowego grafenu płatkowego C1. Wydaje się również, że najbardziej jednorodną mikrostrukturę, z drobnymi, izometrycznymi ziarnami wykazuje spiek z dodatkiem reaktywnej odmiany węgla tj. czerni węglowej w ilości 1%. Czy zatem o wyborze odmiany węgla, zdecydowały głównie względy ekonomiczne i powszechność grafitu ?

8. Po przeczytaniu pracy nasuwa mi się jeszcze jedno pytanie. Z wieloletnich, także i moich badań, wynika, że zbyt wysoka temperatura spiekania lub znacznie przekroczony dodatek boru silnie inicjują jednokierunkowy rozrost ziaren SiC. Taki rozrost ziaren występuje w spiekach badanych przez Doktoranta. Czy zatem na ten rozrost ziaren nie ma wpływu zastosowana technika spiekania SPS, w przypadku której występuje problem z kontrolą temperatury, która dodatkowo może lokalnie istotnie wzrosnąć ? Czy zatem nie warto rozważyć przeprowadzenia prób spiekania osnowy i kompozytów prostszymi technikami np. techniką spiekania pod ciśnieniem lub nawet spiekania swobodnego ?

9. W ostatnim pytaniu, pragnę zapytać co Autor przyjmował za gęstość teoretyczną, w przypadku obliczeń gęstości względnej spieków SiC oraz kompozytów ?

Zadaniem recenzenta jest zwrócenie uwagi na różne aspekty pracy, w tym i błędy edycyjne. W pracy występują drobne błędy literowe (np. str. 20, 21, 65, 67) czy złe odwołanie do rysunku (str. 77, powinno być rysunek 48). Patrząc całościowo na pracę należy jednak podkreślić, że praca napisana jest przejrzysto, a błędy edycyjne nie umniejszają wartości merytorycznej pracy. Pracę czyta się z przyjemnością.

Podsumowanie

Podsumowując, pragnę stwierdzić, że wymienione przeze mnie uwagi krytyczne w żaden sposób nie obniżają wartości merytorycznej pracy i mają charakter dyskusyjny, a wyniki są wartościowe i mogą znaleźć praktyczne zastosowanie. Do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam:

- Wykazanie, że za pomocą techniki SPS istnieje możliwość wytworzenia gęstych polikryształów SiC o właściwościach mechanicznych typowych dla tego materiału,
- Zwrócenie uwagi na przemianę polimorficzną β SiC- α SiC i wpływu dodawanych odmian węgla na tę przemianę,
- Podjęcie prób spiekania kompozytów z osnową SiC i wtrąceniami kryształów warstwowych – węglików tytanu Ti_2C i Ti_3C_2 ,
- Wyjaśnienie procesów zachodzących podczas spiekania kompozytów m.in. za pomocą wysokiej jakości zdjęć mikroskopowych.

Biorąc pod uwagę całość badań, oryginalność i jakość wyników a także ich dyskusję oraz wartość praktyczną stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana magistra Mateusza Petrusa spełnia warunki określone w art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65 poz. 595 z późn. zmianami) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Warszawskiego **o dopuszczenie Pana magistra Mateusza Petrusa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Uwzględniając fakt, że wyniki zostały opublikowane w bardzo dobrym czasopiśmie naukowym o dużym czynniku wpływu (IF) oraz wykazują potencjał aplikacyjny i wskazują nowe kierunki badań wnoszę **o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**

Dr hab. inż. Agnieszka Gubernat, prof. AGH