

Zabrze, 15 styczeń 2024 r.

Dr hab. inż. Urszula Szeluga, prof. CMPW PAN
Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych
Polska Akademia Nauk

RECENZJA**rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Krzysztofa Lisa pt. „Opracowanie technologii pokrywania ścieżek i drutów miedzianych warstwami grafenowymi do zastosowań w elektronice”**

Podstawą mojej recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Krzysztofa Lisa było pismo nr RDND05/69/2023 podpisane przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Chemiczna Politechniki Wrocławskiej, Panią prof. dr hab. inż. Grażynę Gryglewicz z dnia 14 listopada 2023 r., z dołączoną Uchwałą nr 365/43/RDND05/2021-2023 z dnia 30 października 2023 r. dotyczącą powołania mnie na Recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria chemiczna.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Krzysztofa Lisa została zrealizowana w Polskim Ośrodku Rozwoju Technologii (PORT) wchodzącym w skład Sieci Badawczej Łukasiewicz w ramach drugiej edycji programu „Doktoraty wdrożeniowe”. Pracę wykonano pod kierunkiem Pani prof. dr hab. inż. Grażyny Gryglewicz z Katedry Inżynierii Procesowej i Materiałów Polimerowych i Węglowych Politechniki Wrocławskiej oraz Pani dr hab. inż. Alicji Bachmatiuk z Sieci Badawczej Łukasiewicz – PORT Polski Ośrodek Rozwoju i Technologii we Wrocławiu. Praca była finansowana częściowo w ramach projektu POIR.04.01.02-00-0103/17 finansowanego przez NCBiR.

1. Znaczenie podjętej tematyki


Tematyka zrealizowanej pracy mieści się w aktualnych nurtach światowych badań prowadzonych nad opracowaniem wysokoefektywnych rozwiązań systemów mikroelektronicznych. Ciągła miniaturyzacja elementów elektronicznych prowadzi do nowych rozwiązań związanych ze stosowaniem siatek coraz cieńszych linii przewodzących, co przypadku stosowania szczególnie miedzi prowadzi do konieczności opracowania zabezpieczeń połączeń przewodzących przesyłających prąd o znacznym natężeniu ze względu na ich niewystarczającą odpornością na korozję oraz przed występowaniem zjawiska migracji elektronowej.

Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych jest instytutem Polskiej Akademii Nauk

tel. 32 271 60 77
faks 32 271 29 69
sekretariat@cmpw-pan.pl
www.cmpw-pan.edu.pl

Nr rej. RIN-III-70/11
NIP: 648-000-67-14
Konto bankowe:

48 1130 1091 0003 9112 2420 0001



Pan mgr inż. Krzysztof Lis postawił sobie ambitne zadanie i w swojej rozprawie doktorskiej podjął się opracowania powtarzalnych metod wytwarzania powłok o wysokiej jakości oraz o zdefiniowanej liczbie warstw grafenowych na powierzchniach miedzianych. W tym celu opracował i skonstruował dwa systemy pracujące w pod zmniejszonym ciśnieniu do syntezy grafenu prowadzonej w sposób ciągły i okresowy, opierających się na metodzie chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD). Oba systemy charakteryzowały się możliwością wsparcia procesów syntezy plazmą uzyskiwaną z generatora fal radiowych o regulowanej mocy. System do ciągłej syntezy grafenu stanowi unikalne rozwiązanie konstrukcyjne opracowane w ramach pracy do pokrywania drutów miedzianych. System działający w trybie okresowym został zaprojektowany i zoptymalizowany do procesów uzyskiwania warstwy grafenowej na foliach do następczego transferu oraz do pokrywania ścieżek przewodzących napylnych na różnych podłożach. Niewątpliwą zaletą tych rozwiązań jest przystosowanie opracowanych rozwiązań do stosowania organicznych prekursorów materiału węglowego zarówno w formie gazowej, co ważne stosując wyłącznie niepalne mieszanki gazów, jak i postaci ciekłych prekursorów organicznych. Wytworzone pokrycia, poprzez opracowanie odpowiednich procedur analitycznych, był w stanie szczegółowo zbadać, ocenić i opisać. Między innymi opracował nową metodę przenoszenia warstw grafenu z powierzchni miedzi na siatki do analizy metodą transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM) bez wykorzystania polimetakrylanowej powłoki ochronnej, co przyczyniło się do zmniejszenia liczby defektów w strukturze grafenu i redukcję innych zanieczyszczeń.

Doktorant przeprowadził ponadto badania porównawcze jakości warstw grafenowych nanoszonych na druty miedziane w procesie CVD z jakością pokrycia tlenkiem grafenu oraz z komercyjnym pokryciem poliuretanowym, a także zbadał szczegółowo skuteczność zabezpieczenia poszczególnych powłok przed wpływem warunków starzenia i wysokiej temperatury na zmiany rezystancji i stopień degradacji powierzchni drutów.

Podjęta tematyka ma zatem istotne znaczenie w kontekście szerokiego spektrum nowych procedur wytwarzania pokryć elementów miedzianych przy wykorzystaniu zmodyfikowanej metody CVD oraz metod alternatywnych, a wyniki badań potwierdziły skuteczność ochronnych warstw grafenowych. Dlatego uważam, że wybór tematyki rozprawy doktorskiej jest jak najbardziej trafny, aktualny i w pełni uzasadniony potrzebami nowych technologii.

2. Ocena formalna rozprawy doktorskiej

Praca doktorska pana mgr. inż. Krzysztofa Lisa została zredagowana w języku polskim, ma typowy układ i liczy 123 strony. Na początku znajduje się krótki Wstęp, który bardzo dobrze i syntetycznie wprowadza do tematyki podjętej w pracy. Po nim następuje Część literaturowa, przedstawiająca na 38 stronach aktualny stan wiedzy dotyczący zakresu pracy. Widać, że Doktorant bardzo dobrze przeanalizował literaturę, swobodnie porusza się w obszarze podjętej tematyki badawczej. Rozdział 2 pracy to sprecyzowany syntetycznie Cel i Zakres rozprawy (2 str.). Klarownie i wyczerpująco naświetla on problem badawczy i tematykę doktoratu oraz idealnie przedstawia ideę przeprowadzonych prac eksperymentalnych.

W Rozdziale 3 na 3 stronach omówiono Metodykę badań odnoszącą się do ogólnego opisu wykorzystanych technik pomiarowych bez szczegółowych informacji na temat przygotowania poszczególnych powłok grafenowych do analiz, gdyż te informacje zostały przypisane do poszczególnych procedur ich wytwarzania zawartych w Rozdziale 4. W Rozdziale 3 opisano także warunki syntezy tlenku grafenu stosowanego jako materiał porównawczy podczas oceny jakości powłok grafenowych na drutach miedzianych przygotowywanych metodą CVD w testach starzeniowych. W Rozdziale 4 umieszczono Część eksperymentalną pracy zawierającą zarówno szczegółowy opis założeń konstrukcyjnych oraz modyfikacji i przystosowania systemów CVD do ciągłej i okresowej syntezy grafenu do bezpośredniego pokrywania materiałów miedzianych w formie drutów, folii i ścieżek miedzianych jak i optymalizację parametrów obu procesów w kierunku uzyskania najlepszej jakości powłok grafenowych. Rozdział ten zawiera również opis przygotowania podłoży miedzianych oraz opracowanie metod analitycznych do oceny jakości grafenu. Rozdział 5 to Wnioski końcowe (1 str.). Pracę kończy spis 228 pozycji literaturowych, oraz spis 57 rysunków i 8 tabel zawartych w pracy. Dołączono także dwustronicowe Streszczenie w języku polskim oraz w języku angielskim. Na końcu umieszczono zestawienie dorobku naukowego doktoranta. Pracę charakteryzuje bardzo dobra proporcja pomiędzy częścią literaturową a doświadczalną.

Praca napisana jest w sposób zrozumiały, a pod kątem edytorskim jest przygotowana starannie i jak na tak duży zakres badawczy w sposób przejrzysty dla Czytelnika. Niestety Doktorant nie uniknął dość wielu błędów interpunkcyjnych, gramatycznych, językowych, stylistycznych oraz powtórzeń. Mimo tych błędów językowych, niedociągnięć stylistycznych praca ogólnie jest napisana pod względem edytorskim starannie, a błędy te nie wpłynęły na moją ogólnie wysoką ocenę pracy.

Poniżej z uwagi na funkcję Recenzenta zamieszczam jedynie najistotniejsze uwagi edytorskie:

- Doktorant zamiennie używa terminów „rozmiar” i „wymiar” cząstek, a także określenia „ilość” i „liczba”. Należy zaznaczyć, że w przypadku cząstek są one charakteryzowane przez wymiary, grafen jedno-, dwu- lub trójwymiarowy, a nie rozmiary. W przypadku warstw grafenowych, mamy do czynienia z liczbą a nie ilością.
- Brak opisu osi Y na Rys. 15.
- Mając na uwadze szerokie spektrum prac badawczych, korzystne na większą przejrzystość pracy wpłynęłoby wyodrębnienie Rozdziału zatytułowanego Omówienie Wyników, w którym Doktorant mógłby zawrzeć najbardziej kluczowe wyniki związane z optymalizacją procesów CVD i oceną jakości otrzymanych podłoży grafenowych.
- W przypadku opisu zdjęć zamieszczonych na Rys. 36 pojawiła się rozbieżność pomiędzy podpisem pod rysunkiem, a tekstem poniżej tego rysunku. W podpisie zdjęć powierzchni drutów po testach starzeniowych przyporządkowane są one do pozycji a, c, e, natomiast w tekście poniżej, w omówieniu tego rysunku jest wzmianka o rys. 36 c i d. Proszę o sprawdzenie.

- Na str. 75 zamiast rozdziału 5.1. we fragmencie „Pełną ocenę wpływu powłok grafenowych na drutach miedzianych” powinno być rozdział 4.5.
- Wnioski końcowe w mojej opinii stanowią podsumowanie prac zrealizowanych w ramach doktoratu, ale zostało to opisane bardzo syntetycznie i pozwala doskonale zorientować się w zakresie problemów podjętych przez Doktoranta.

3. Ocena merytoryczna

Układ Części Literaturowej pozwala w sposób wyczerpujący zapoznać się z zagadnieniami związanymi z tematyką podjętą w pracy doktorskiej. Informacje zawarte w tej części są przedstawione w sposób logiczny, co pozwala na wprowadzenie do Części Eksperymentalnej i zrozumienie podjętych w niej przez Doktoranta wyzwań. Tę sekcję rozpoczynają ogólne informacje związane z historią i właściwościami grafenu i jego pochodnych. Doktorant podkreślił, że pomimo intensywnego rozwoju badań materiałów grafenowych w ostatnich dwóch dekadach, przejawiającego się olbrzymim wzrostem liczby publikacji, struktury grafenowe były szczegółowo analizowane już w pracach datowanych na pierwszą połowę XX w. jako węglowe warstwy poliaromatyczne wchodzące w skład uporządkowanych pakietów oraz struktur turbostratycznych w graficie i wysokouwęglowych naturalnych węglach. Obecnie, oprócz jednoatomowego grafenu, badane intensywnie jest szerokie spektrum różnych materiałów grafenowych. Doktorant w racjonalny sposób podchodzi do błyskawicznego rozwoju prac dotyczących materiałów grafenowych, zarówno tych naukowo-badawczych jak i wdrożeniowych. Podkreśla powszechnie występujące zjawisko stosowania określenia “grafen” do różnych materiałów zawierających płaszczyzny grafenowe, które jednak często strukturalnie znacząco odbiegają od struktury pojedynczej warstwy niezdefektowanego grafenu.

Na podstawie literatury zostały opisane techniki otrzymywania czystego grafenu metodą CVD z różnych prekursorów oraz na różnych podłożach metalicznych, a także inne stosowane powszechnie metody uzyskiwania wysokiej jakości grafenu oraz materiałów grafenowych typu tlenku grafenu i jego zredukowanych form.

Doktorant dokonał niezbędnego, w odniesieniu do tematyki pracy, przeglądu technik pokrywania powierzchni miedzi materiałem grafenowym w okresowych i ciągłych procesach CVD. Przedstawił syntetyczne zestawienie stanu wiedzy na temat procedur optymalizacji pod kątem doboru temperatury prowadzenia procesu, ciśnienia syntezy, jak również określenia wpływu zawartości wodoru w gazie nośnym, stężenia źródła węgla oraz odpowiedniego przygotowania podłoża miedzianego. Ze względu na przeprowadzone w ramach pracy badania związane z wykorzystaniem powierzchni miedzianych pokrywanych grafenem płatkowych i tlenkiem grafenu opisano metody zanurzeniowe, elektrochemiczne oraz napyłania do uzyskania powłok grafenowych na miedzi. Część literaturową kończy rozdział poświęcony suchym i mokrym technikom przenoszenia wysokiej jakości warstw grafenowych z jednego podłoża, zazwyczaj miedzianego, na inne powierzchnie, np. krzemowe, polimerowe lub metaliczne wraz z analizą wad i zalet poszczególnych procedur i ich wpływu na strukturę warstwy przeniesionej.

Należy zaznaczyć, że Doktorant pisząc część literaturową pracy korzystał z najnowszych doniesień literaturowych w uznanych czasopismach anglojęzycznych. Większość cytowań pochodzi z ostatniej dekady, a dobór pozycji literaturowych jest poprawny i zgodny z podjętą tematyką pracy.

Pan mgr Krzysztof Lis w ramach realizacji pracy doktorskiej przeprowadził wiele trudnych eksperymentalnie prac zmierzających do rozwiązania problemów przedstawionych w celu pracy, które wspomagając się trafnie przeprowadzoną analizą doniesień literaturowych rozwiązał wzorowo.

Wyniki uzyskane w ramach przemyślanych i zaplanowanych w sposób logiczny eksperymentów wraz z omówieniem i interpretacją przedstawił w Części Eksperymentalnej.

Należy podkreślić, że praktycznie wszystkie zagadnienia przedstawione w tej części to oryginalne i nowatorskie opracowania własne Doktoranta, rozpoczynające się od rozwiązań konstrukcyjnych, poprzez optymalizację procesów i opracowanie procedur przygotowania próbek i metod analitycznych dedykowanych specjalnie do badanych materiałów, po badania procesów starzeniowych elementów miedzianych pokrytych grafenem.

Doktorant rozpoczyna tę część od przedstawienia zagadnień związanych z konstrukcją systemów do syntezy grafenu metodą CVD, zarówno w sposób ciągły jak i okresowy. Były to prace wstępne, gdyż oba układy o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych w dalszym toku badań zostały poddane modyfikacjom aby uzyskać grafen o jak najlepszych parametrach oraz aby finalnie układy te spełniały wymagania wdrożeniowe. System CVD do pokrywania kilkuwarstwowym grafenem drutów miedzianych o różnych średnicach w sposób ciągły w celu zabezpieczenia przed korozją był rozwiązaniem nowatorskim, głównie ze względu na innowacyjne rozwiązanie układu do podawania i odbierania drutu ze strefy reakcyjnej. Na podstawie obserwacji mikroskopowych SEM, Doktorant określił maksymalne temperatury pracy przy optymalnych parametrach prowadzenia procesu. Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki, na podstawie analizy doniesień literaturowych wybrał następnie rozwiązania konstrukcyjne do syntezy grafenu przy możliwości wykorzystania prekursorów węgla zarówno gazowych, głównie niepalnych, jak i ciekłych. Dobre warunki, z jednej strony zapobiegały degradacji drutów, ale z drugiej strony wymusiły wspomaganie syntezy plazmą generowaną falami radiowymi, co przełożyło się na konieczność prowadzenia procesów pod zmniejszonym ciśnieniem, a w efekcie końcowym wymagało modyfikacji systemu i rozbudowę o elementy przewijania drutu w komorach pracujących pod zmniejszonym ciśnieniem.

W kolejnym etapie zostały przeprowadzone analogiczne prace mające na celu opracowanie systemu CVD do okresowej syntezy grafenu na folii miedzianej przeznaczonej do transferu oraz do pokrywania ścieżek miedzianych na różnych podłożach. Doktorant mając na uwadze, że w przeciwieństwie do ciągłego procesu pokrywania drutów, osadzanie grafenu na foliach miedzianych nie jest limitowane temperaturowo, starał się dobrać warunki termiczne tak, aby nie zmienić parametrów użytkowych ścieżek i nie doprowadzić do ich destrukcji. Wspomagając się także doniesieniami literaturowymi na temat ustalania warunków procesu,

w tym czasie, temperatury, ciśnienia syntezy i źródła węgla dla różnych podłoży, zdecydował o konieczności wspomagania systemu plazmą generowaną przez fale radiowe.

W pracy opisano metody oczyszczania powierzchni drutów, folii i ścieżek miedzianych, a w przypadku ścieżek dobrano ponadto metodę napyłania z wykorzystaniem maski stalowej. Przeprowadzono badania porównawcze oraz wpływu procedury zmniejszania chropowatości poprzez polerowanie, obróbkę termiczną oraz usuwanie tlenków miedzi przez wytrawianie, na finalną jakość powłok grafenowych.

Aby ocenić skuteczność opisanych w dalszej części rozprawy procedur optymalizacyjnych procesów CVD, Doktorant zaproponował specjalnie dostosowane metody oddzielenia warstw grafenowych od powierzchni miedzi jak i metody analityczne z wykorzystaniem mikroskopii optycznej, transmisyjnej mikroskopii elektronowej, spektroskopii Ramana, spektroskopii fotoelektronów (XPS) oraz pomiarów rezystancji w celu oceny jakości uzyskiwanych powłok grafenowych, szczególnie pod kątem ich antykorozyjnych właściwości. Na szczególną uwagę zasługuje opracowanie przez Doktoranta metody transferu grafenu z minimalną liczbą defektów i zanieczyszczeń, bez udziału jak w typowych metodach stabilizującej i ochronnej warstwy polimerowej, na siatki TEM z możliwością zastosowania również do przenoszenia na inne płaskie podłoża. Zaproponowaną metodę porównał dodatkowo z dwiema powszechnie stosowanymi technikami z wykorzystaniem wosku i PMMA.

Z kolei pracochłonna i szczegółowa optymalizacja procesów CVD, tak ciągłego jak i okresowego pod zmniejszonym ciśnieniem i wspomaganych plazmą, doprowadziła do sprecyzowania najbardziej odpowiednich parametrów tych procesów, procedur przygotowania powierzchni miedzianych oraz źródła węgla do uzyskania najlepszej jakości grafenu jako pokrycia powierzchni miedzianych, a w przypadku metody okresowej, także na potrzeby przenoszenia warstw grafenowych na inne podłoża bez niszczenia ich struktury. Doktorant, mając na uwadze wdrożenie badanego systemu CVD, wziął pod uwagę aspekty bezpieczeństwa i przystosował oraz zoptymalizował oba z tych systemów do pracy bez stosowania palnych mieszanek, wprowadzając zamiast metanu, pary ciekłych węglowodorów i ich pochodnych wprowadzanych przy użyciu mieszaniny argonu z 5% zawartością wodoru jako gazu nośnego. Zgodnie z przewidywaniami Doktorant potwierdził, że najlepsze parametry strukturalne grafenu uzyskał stosując benzen, dla którego przeprowadził optymalizację warunków temperaturowych pokrywania drutów o różnych średnicach, folii oraz ścieżek miedzianych, stosując stały przepływ gazu nośnego, par benzenu oraz czasu syntezy, wskazując na konieczność prowadzenia procesu powyżej 850°C.

Po zoptymalizowaniu procesów CVD, Pan Lis przeprowadził badania odporności antykorozyjnej oraz odporności termicznej uzyskanych drutów miedzianych pokrytych powłokami grafenowymi w odniesieniu do czystych drutów miedzianych, zarówno oczyszczonych jak i wygrzewanych. Dodatkowo porównał te właściwości z analogicznymi parametrami drutów pokrytych tlenkiem grafenu oraz komercyjnego drutu pokrytego lakierem poliuretanowym. Szczegółowe badania mikroskopowe, spektroskopii Ramana i XPS, oraz pomiary rezystancji wykazały, że 2-3 warstwowe powłoki grafenowe uzyskane metodą CVD

wspomaganej plazmą jak i powłoki tlenku grafenu nanoszone prostą metodą zanurzeniową skutecznie chronią powierzchnię miedzi przed korozją i utlenianiem w testach starzeniowych w komorach solnych oraz w podwyższonej temperaturze w porównaniu do powłok komercyjnych. Z kolei powłoki nanoszone na ścieżki miedziane na różnych podłożach zostały poddane badaniom wpływu temperatury na zmiany rezystancji. Doktorant podsumował te badania, że jedynie w przypadku podłoża szklanego, optymalnie krzemowego, widać pozytywny wpływ na warstwy ochronnej na wartości rezystancji.

Na podstawie przeprowadzonych przez Doktoranta badań do jego oryginalnego i samodzielnego dorobku zaliczam:

- Opracowanie i optymalizacja ciągłej metody CVD pod zmniejszonym ciśnieniem z wykorzystaniem plazmy generowanej za pomocą fal radiowych do pokrywania drutów miedzianych pokryciem grafenowym o ściśle zdefiniowanej liczbie warstw;
- Opracowanie i optymalizacja okresowego niskotemperaturowego systemu CVD do pokrywania ścieżek miedzianych grafem o wysokiej jakości bez ich destrukcji;
- Opracowaną efektywną metodę przenoszenia grafenu bez zmian strukturalnych na siatki TEM i inne powierzchnie płaskie;

Pytania na które prosiłabym Doktoranta o odpowiedź:

- Czy Doktorant mógłby sprecyzować parametry grafitu stosowanego do syntezy tlenku grafenu, zarówno wyjściowego jak i po mieleniu w młynie kulowym. Wymiary grafitu mają bezpośrednie przełożenie na strukturę i właściwości finalnego produktu utleniania. A także, czy mógłby Pan podać charakterystykę uzyskanego tlenku grafenu.
- W Rozdziale 4.2. Doktorant wspomina o próbach nanoszenia ścieżek miedzianych na podłożach wykorzystując fotorezyst. Podanie krótkie wyjaśnienie jakiego rodzaju fotorezyst stosowano i jaki był przewidywany efekt jego wykorzystania rozjaśniłby bardziej tę kwestię.
- Doktorant zarówno w kilku miejscach w pracy jak i we Wnioskach wspomina o wykorzystaniu systemów CVD jak i badanych procedur jako wdrożeń przemysłowych. Czy mogę prosić o bliższe informacje na temat tych wdrożeń, zarówno związanych z wykorzystaniem materiałów grafenowych jako pokryć powierzchni miedzianych jak i opracowanych systemów do syntezy pokryć grafenowych na różnego rodzaju podłożach miedzianych, oczywiście w stopniu w którym mogą one być przedstawiane do wiadomości ogólnej?

4. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonej recenzji dysertacji doktorskiej pana mgr. inż. Krzysztofa Lisa pt. **“Opracowanie technologii pokrywania ścieżek i drutów miedzianych warstwami grafenowymi do zastosowań w elektronice”** potwierdzam, że w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie inżynieria chemiczna w myśl obowiązującej Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. z 2020 r. poz.85 z późn. zm).

Zrealizowany przez Doktoranta zakres badań jest oryginalny i stanowi znaczny wkład w rozwój nauk inżyniersko-technicznych, a jego całościowy dorobek naukowy jest spójny tematycznie i jest oryginalny. Na uwagę zasługuje jego doświadczenie w kierowaniu zadaniami w ramach projektów zbliżonych tematycznie do zagadnień, których wyjaśnienia podjął się w niniejszej dysertacji. Ponadto praca: 1) jest bardzo bogata metodycznie, 2) stanowi przyczynek do poszerzenia wiedzy na temat metod syntezy pokryw grafenowych do zastosowań elektronicznych i nie tylko; 3) dostarcza nowych i wartościowych informacji na temat projektowania innowacyjnych systemów CVD; 4) bezpośrednio wskazuje zastosowana praktycznie; 5) prezentuje wyniki, z których część została opublikowana, a więc przeszła wnikliwy proces recenzji w renomowanych czasopismach, a ponadto, 6) doktorant ze swobodą wykorzystuje i modyfikuje do własnych potrzeb różnorodne narzędzia badawcze stosowane nie tylko w naukach inżyniersko-technicznych, ale również w naukach chemicznych, biologicznych i medycznych. Biorąc powyższe pod uwagę wnoszę o przyjęcie pracy oraz dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Arszula Szeluga