

Wrocław, 31 lipca 2019 r.

dr hab. inż. Andrzej Sikora, prof. IEL
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Elektrotechniki,
Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego
we Wrocławiu
ul. M. Skłodowskiej-Curie 55/61
50-369 Wrocław

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Marcina Michałowskiego zatytułowanej

„Rozwój mikroskopii sił atomowych na potrzeby projektowania mikrouządzeń mechanicznych”

Podstawą formalną przygotowania niniejszej recenzji było zlecenie dziekan Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. Natalii Golnik.

1. Zasadność podjęcia tematu oraz ocena oryginalności problematyki

Obserwowany rozwój technik diagnostycznych umożliwiających wykonywanie zaawansowanych pomiarów w skali submikrometrowej jest wynikiem realizacji prac badawczych i wprowadzania innowacyjnych rozwiązań w praktyce naukowej i przemysłowej. Jednym z kluczowych motorów tego zjawiska jest duże zainteresowanie nanomateriałami i wynikająca z tego konieczność ich wszechstronnej charakteryzacji. Ponadto, coraz powszechniej dostępne możliwości wytwarzania mikrouządzeń mechanicznych (MEMS, MOEMS), a nawet systemów nanomechanicznych (NEMS), również stymulują poszukiwania optymalnych rozwiązań technologicznych, konstrukcyjnych i materiałowych, w badaniach których, jako jedno z kluczowych narzędzi diagnostycznych, może mieć zastosowanie mikroskopia sił atomowych. Należy tu również wspomnieć nauki biologiczne i medyczne, w których także rośnie popularność AFM jako wartościowego i wszechstronnego narzędzia badawczego.

W świetle powyższego, tematykę poddanej do recenzji rozprawy doktorskiej pt. „Rozwój mikroskopii sił atomowych na potrzeby projektowania mikrouządzeń mechanicznych” autorstwa mgra inż. Marcina Michałowskiego należy ocenić jako wpisującą się w ten nurt, a tym samym aktualną i istotną. W szczególności, niniejsza praca dotyczy eksploracji obszaru mikro- i nanomechaniki na potrzeby projektowania i konstruowania mikrouządzeń mechanicznych. Jako podstawowe narzędzie badawcze, mgr inż. Marcin Michałowski zastosował mikroskopię sił atomowych, którą wielotorowo rozwijał i stosował we wspomnianym obszarze badawczym. Co istotne, w swoich pracach Autor poświęca dużo uwagi aspektowi pomiarów ilościowych, a przez to wprowadza metody kalibracji pozwalające na obiektywne porównywanie uzyskiwanych wyników. Zaprezentowane w recenzowanej rozprawie rezultaty prac badawczych są bez wątpienia oryginalne i świadczą o świadomie wybranej przez mgra Michałowskiego tematyce pracy naukowej umożliwiającej uzyskiwanie wartościowych wyników poznawczych i aplikacyjnych. Należy podkreślić z całą mocą, że zagadnienia ilościowych pomiarów właściwości mechanicznych w nanoskali są obecnie jednym z istotnych problemów, angażujących zespoły badawcze na całym świecie. Daje się zauważyć

wyraźnie rosnące potrzeby dostępu do miarodajnych narzędzi i technik pomiarowych, pozwalających sprawnie charakteryzować materiały oraz wytwarzane z nich elementy. Dlatego też w kontekście zasadności i aktualności tematyki naukowej należy wysoko ocenić pracę mgra Michałowskiego.

2. Ogólna charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa bazuje na cyklu siedmiu prac które stanowią: publikacje w renomowanych czasopismach naukowych, komunikat w materiałach konferencyjnych oraz rozdział monografii. Wszystkie te prace dotyczą rozwoju mikroskopii sił atomowych oraz wykorzystania wybranych technik AFM w diagnostyce właściwości mechanicznych powierzchni.

Rozprawa ma 149 stron i zawiera kolejno: we wstępie – opis dotychczasowej pracy naukowej autora i wprowadzenie do tematyki badawczej, w przewodniku po publikacjach – wykaz prac wraz z zestawieniem parametrów bibliograficznych autora oraz przegląd zagadnień naukowych opisanych w poszczególnych publikacjach. W dalszej kolejności Autor zawarł: krótki plan przyszłych działań które planuje jako kontynuację dotychczas realizowanej tematyki badawczej, podsumowanie i spis literatury. Odrębną częścią rozprawy jest zbiór prac będących podstawą rozprawy. Pozycje te, poddane już ocenie recenzentów, nie budzą zastrzeżeń co do jakości naukowej ani strony językowej czy redakcyjnej, aczkolwiek w jednym przypadku, w rozdziale stanowiącym część materiałów konferencyjnych, kilka defektów umknęło autorom jak i edytorom. Rozprawę zamykają oświadczenia współautorów o wkładzie w powstanie poszczególnych prac. Wspomniany wcześniej spis literatury zawiera 105 pozycji, z których prawie połowa ukazała się na przestrzeni ostatnich pięciu lat, co świadczy zarówno o osadzeniu realizowanych badań w aktualnym nurcie prac naukowych jak i o znajomości bieżącej literatury przedmiotu.

Ważnym źródłem informacji o aktywności i kompetencjach naukowych Autora jest zestawienie udziału procentowego w przygotowaniu poszczególnych publikacji wraz ze szczegółowym opisem zadań i czynności które wykonywał mgr inż. Marcin Michałowski podczas poszczególnych etapów planowania oraz realizacji prac badawczych i edytorskich.

Należy podkreślić, że wyżej wspomniany udział procentowy i jak również kompetencyjny Autora w przygotowaniu poszczególnych prac jest znaczący lub wręcz kluczowy, a w jednym przypadku zaprezentowana jest praca monoautorska. Za właściwą należy uznać tendencję wzrostową udziału procentowego wkładu w przygotowanie publikacji, świadczą o rozwijającej się dojrzałości naukowej Autora, potrafiącego już samodzielnie zrealizować wszystkie etapy: od opracowania koncepcji pracy, po przygotowanie i wysłanie manuskryptu. Wskaźniki bibliograficzne pozwalają bardzo wysoko ocenić zaprezentowany dorobek naukowy. Zarówno wskaźniki oddziaływania, czyli tzw. Impact Factor, jak również punkty przyznane czasopismom przez MNiSW po zsumowaniu dają odpowiednio: 9,237 oraz 153. Ponadto, prace te były cytowane 13 razy, co w kontekście okresu który upłynął od ich wydania, od 2015 roku w przypadku najstarszych dwóch prac, jest wartością dobrą, biorąc pod uwagę specyfikę zagadnienia i potencjalny, względnie wąski, krąg odbiorców. Cały dorobek naukowy Autora był natomiast cytowany 21 razy (wg bazy Scopus). Przyglądając się poszczególnym pracom można wyszczególnić dwa główne nurty badawcze. I tak znajdujemy:

- w obszarze rozwijania możliwości diagnostycznych mikroskopii sił atomowych ze szczególnym uwzględnieniem charakteryzowania właściwości mechanicznych powierzchni:

Cantilevers with spherical tips of millimeter magnitude, Journal of Micromechanics and Microengineering (2019) – praca dotyczy wytwarzania sond pomiarowych wykonanych z brązu

berylowego, wyposażonych w sferyczne końcówki pomiarowe z materiału pozwalającego na skuteczne i miarodajne zmierzenie właściwości mechanicznych powierzchni w przypadku gdy komercyjnie dostępne sondy pomiarowe, ze względu na ograniczenia konstrukcyjne, nie pozwalają na przeprowadzenie eksperymentu,

Simulation model for frictional contact of two elastic surfaces in micro/nano scale and its validation, Nanotechnology Reviews (2018) – praca dotyczy opracowania i weryfikacji modelu tarcia powierzchni badanej i sondy pomiarowej, pozwalającego na ujęcie złożoności tego zjawiska w mikro- i nanoskali, przy jednoczesnym uproszczeniu podejścia względem obliczeń bazujących na dynamice molekularnej, wymagającej użycia jednostek obliczeniowych o dużej wydajności,

- w obszarze badania właściwości mechanicznych powierzchni mających mieć zastosowanie w wytwarzaniu mikrouządzeń mechanicznych:

Influence of deposition temperature during LPCVD on surface properties of ultrathin polysilicon films, Microsystem Technologies (2018) – praca dotyczy badania właściwości mechanicznych warstw polikrzemowych osadzanych techniką LPCVD na podłożu krzemowym, jako rozwiązania mającego obniżyć tarcie między elementami ruchomymi w strukturach MEMS,

Surface mechanical properties/ Characterization of Polymeric Biomaterials, Woodhead Publishing (2017) – jest pracą przeglądową opublikowaną jako rozdział monografii, dość szeroko opisującą możliwości diagnostyczne mikroskopii sił atomowych, ze szczególnym uwzględnieniem badania właściwości mechanicznych powierzchni,

Impact of graphene coatings on nanoscale tribological properties of miniaturized mechanical objects/ Advanced Mechatronics Solutions. Advances in Intelligent Systems and Computing (2016) – jest rozdziałem w zbiorze materiałów konferencyjnych, prezentującym wyniki badań właściwości mechanicznych warstw grafenowych naniesionych na podłoża stalowe, a mających za zadanie poprawę właściwości trybologicznych elementów ruchomych maszyn i urządzeń,

Elastic Properties of the Annular Ligament of the Human Stapes—AFM Measurement, Journal of the Association for Research in Otolaryngology (2015) – jest publikacją prezentującą wyniki badań właściwości mechanicznych strzemiączka ludzkiego, a ukierunkowanych na uzyskanie bardziej miarodajnych niż dotychczas wyników na potrzeby wiernego odtwarzania elementów ucha w ramach protetyki słuchu,

Computational study of the effect of side wall quality of the template on release force in nanoimprint lithography, Japanese Journal of Applied Physics (2015) – w niniejszej pracy przedstawiono badania próbek testowych przygotowanych na potrzeby doboru optymalnych parametrów procesu litografii nanodrukowej, celem poprawy jakości usuwania PMMA ze struktur krzemowych i tym samym zmniejszenia liczby powstających defektów.

Rysujący się w wymienionych powyżej pracach dość szeroki zakres prac badawczych pozwala zauważyć wszechstronność mgra inż. Marcina Michałowskiego. Dobrze radzi on sobie zarówno z zagadnieniami modelowania (w tym również opracowania modelu zjawisk tarcia), pracami konstrukcyjno – technologicznymi, pomiarami właściwości próbek jak również zadaniami kalibracji, przetwarzania i interpretacji wyników pomiarowych. Cecha ta pozwala Autorowi biegłe realizować kompleksowe prace badawcze i skutecznie włączać się do działań realizowanych przez inne zespoły badawcze.

3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne oraz pytania do Doktoranta

Lektura zaprezentowanych prac pobudza do sformułowania pewnych uwag i pytań. W pierwszej kolejności należy podkreślić dość staranne przygotowanie pracy: struktura jest czytelna, ilustracje przejrzyste i dobrej jakości. Niestety nie udało się uniknąć w treści błędów literowych, interpunkcyjnych czy też fleksyjnych. Zabrakło też dokładności w przygotowywaniu spisu literatury, co spowodowało że czytelnik musi włożyć pewien wysiłek aby znaleźć interesujące go pozycje. Szczegółowe uwagi w tej materii przekazano Autorowi bezpośrednio.

Uwagi i pytania dotyczące treści rozprawy:

- we wprowadzeniu Autor ograniczył się do opisu działania układu detekcji wychylenia sondy skanującej AFM oraz zwięzłego wspomnienia o układzie piezoaktuacji, sugerując że jest to kompletny opis działania mikroskopu sił atomowych. Również podpis rysunku nr 1 sugeruje taki zakres informacyjny, podczas gdy ilustracja ograniczona jest jedynie do zaprezentowania układu optycznej detekcji wychylenia sondy. Takie uproszczenie może być mylące dla czytelnika po raz pierwszy mającego do czynienia z tą materią,

- jaką uzyskano powtarzalność parametrów eksploatacyjnych (jak np. stała sprężystości, częstotliwość rezonansowa) zaprezentowanych w pracy [1] sond, które wytwarza się w ramach jednej populacji (jednego procesu technologicznego)?

- czy Autor podjął kontynuację badania przydatności zaprezentowanego w pracy [2] modelu dla powierzchni o rozbudowanej morfologii? Czy od momentu opublikowania model ten znajdował zastosowanie praktyczne?

- czy falistości powierzchni widoczne na rysunku 4 w pracy [3], zorientowane zgodnie z wolną osią skanowania mikroskopu, są faktycznie elementem morfologii badanych próbek, czy też typowym dla niestabilności cieplnej mikroskopów AFM artefaktem? Jeśli zafalowania te nie były artefaktami, w jaki sposób została ta ewentualność wykluczona?

- procedura opisu pokrywania próbek warstwą grafenową zawarta w pracy [5] jest bardzo lapidarna. Zarówno rodzaj grafenu, sposób przygotowania podłoża, jak wreszcie sam proces nanoszenia grafenu, wymagałyby bardziej szczegółowego opisanie. Brak jest również informacji na temat ciągłości i jednorodności przestrzennej warstwy, co może mieć kluczowy wpływ na skuteczność eksploatacji takiej warstwy i jej trwałość,

- w przypadku badań innowacyjnych pokryć na bazie grafenu, dość istotnym zagadnieniem wydaje się stabilność warstw i odporność na ścieranie, jako kolejny po współczynniku tarcia parametr decydujący o przydatności takiej warstwy w układach nanomechanicznych. W publikacji [5] nie znajdujemy wyników weryfikacji tych parametrów, ani też dyskusji w której autorzy zasygnalizowałyby świadomość ich wagi. Czy Autor brał pod uwagę weryfikację tego parametru, a jeśli tak, to w jaki sposób pomiary te miałyby być zrealizowane?

- jak dla próbek o tak złożonym kształcie jakimi są strzemiączka (praca [6]), udało się uzyskać ortogonalność przyłożonej siły do powierzchni, by wyeliminować poślizg końcówki skanującej i powstawanie sił skręcających sondę, które mogłyby negatywnie wpłynąć na wynik pomiaru?

- na jakiej podstawie dla wartości zestawionych w tabeli 2. pracy [6] dla uzyskania wyników statystycznych, podjęto decyzję o obliczeniu wartości średniej? Czy testowano rozkład uzyskanych wartości?

4. Wnioski końcowe

Pomimo drobnych usterek edytorskich i nielicznych uwag merytorycznych, należy uznać wyniki badań przedstawione w recenzowanej pracy jako spełniające wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Mgr inż. Marcin Michałowski w ramach zrealizowanych badań opanował umiejętności niezbędne do przeprowadzania prac konstrukcyjno-technologicznych, wykonania pomiarów i interpretacji uzyskanych wyników, potrafił również opracować rozwiązania techniczno-proceduralne pozwalające na otrzymanie danych ilościowych. Ponadto Autor zademonstrował potencjał w zakresie opracowania, przeprowadzenia modelowania i przetestowania modelu zjawisk fizycznych w nanoskali. Można więc stwierdzić, że Doktorant wykazał się samodzielnością, niezbędną wiedzą teoretyczną a także umiejętnościami praktycznymi w rozwiązaniu problemów naukowych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgra inż. Marcina Michałowskiego spełnia kryteria sformułowane w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki (Dz. U. nr 65 poz. 595 z 14 marca 2003 r. z późn. zmianami). Wobec powyższego zwracam się z wnioskiem do Rady Naukowej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Biorąc również pod uwagę uzyskane osiągnięcia naukowo-aplikacyjne, bogaty dorobek, wszechstronność, oraz szybko uzyskaną samodzielność pracy naukowej mgra inż. Marcina Michałowskiego wnioskuję o wyróżnienie tej rozprawy.

