

**Recenzja pracy doktorskiej Pana mgr inż. Marcina Michałowskiego
przedłożonej Radzie Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej p.t.**

**„Rozwój mikroskopii sił atomowych na potrzeby projektowania
mikrouządzeń mechanicznych”.**

Przedstawiona do recenzji praca zredagowana została w formie popularnego ostatnio przewodnika po cyklu publikacji uzupełnionego tekstami tych publikacji. Dużo miejsca i pracy Autor poświęcił na spełnienie rozmaitych ostatnio stosowanych wymogów formalnych takich jak liczba cytowań oraz innych wskaźników bibliometrycznych tak indywidualnych jak i dotyczących całości dorobku Autora oraz współpracowników . W przypadku gdy praca jest wieloautorska zawarto również informacje dotyczące wkładu pracy p. Michałowskiego w jej powstanie. Manuskrypt pozwala również na zapoznanie się z szerokim zakresem współpracy międzynarodowej w tym z udziałem w projektach badawczych tak krajowych jak i międzynarodowych. Praca dotyczy różnorodnych zastosowań mikroskopu sił atomowych połączonych użyciem wspólnego narzędzia badawczego (AFM) oraz innych metod badawczych. Tak więc należy omówić poszczególne zagadnienia badawcze i następnie wykonać podsumowanie całości dorobku składającego się na rozprawę doktorską.

Publikacja P1.

Dotyczy wytworzenia przykładowych sond pomiarowych w których belki powstały przez jednoczesne wytrawienie wielu belek w jednym procesie. Belki te mogą mieć różne parametry (sztywność). Autor wykorzystał te belki do konstrukcji sond w których „ostrze” pomiarowe stanowi kulka o średnicy nawet części milimetra przyklejone klejem epoksydowym do belki. Zastosowane sondy

umożliwiają dopasowanie ich struktury do badania obiektów o znacznych wymiarach (w skali zastosowań AFM) oraz z uwagi na dużą powierzchnię oddziaływania sonda-próbka ułatwiają prowadzenie badań modelowych zwłaszcza miękkich obiektów gdyż materiały końcówki mogą być różne. Podane przykładowe zastosowania wytworzonych sond dotyczą zagadnień technologicznych. Dalsze przykłady zastosowań sond pomiarowych dotyczą wersji zakończonych kulką o stosunkowo dużej średnicy. Duża średnica sondy ułatwia przeprowadzenie symulacji zjawiska tarcia przy czym dane do rozważań modelowych zaczerpnięto z eksperymentów dotyczących powierzchni. W tym miejscu nasuwa się pytanie o gwarancję czystości kulki po procesie klejenia.

Monoautorska publikacja P2.

Zawiera wyniki obliczeń modelowych w których powierzchnia przedstawiona została jako zbiór prostopadłościanów o określonych właściwościach mechanicznych a oddziaływanie przedstawiono jako oddziaływanie płaskiej powierzchni z drugą powierzchnią w której skumulowano szorstkości obydwu powierzchni. Inne dane potrzebne do obliczeń zaczerpnięto z eksperymentów powierzchniowych. Autor wykonał badania zjawiska tarcia sondy kulkowej AFM o powierzchnię uzyskując dobrą zgodność z wynikami obliczeń modelowych. Z uwagi na poczynione założenia, interesującym byłoby zbadanie stosowalności metod obliczeniowych przy badaniu innych modeli powierzchni oraz sond o różnych średnicach (nie tylko prostopadłościanów). Wyniki tak prac konstrukcyjnych jak i obliczeniowych Doktoranta wykorzystano w następujących publikacjach.

Publikacja P3.

Dotyczy przeprowadzenia badań właściwości warstw polikrystalicznego krzemu osadzonego na powierzchnię utlenionego (izolator) monokryształu krzemu. Nanoszenia warstwy wykonano metodą LPCVD. Przedmiotem badań były właściwości warstwy otrzymane przy różnych parametrach procesu nanoszenia. Wykorzystano przy tym zarówno sondy fabryczne jak i opracowane przez Autora. Uzyskane wyniki prawdopodobnie będą miały znaczenie technologiczne. Poprawnie przeprowadzono pomiary oraz interpretację wyników.

Publikacja P4

mająca charakter monografii stanowi obszerne kompendium wiedzy dotyczącej metod badawczych używanych przy badaniach różnego typu powierzchni a szczególnie biomateriałów . Podstawowym urządzeniem badawczym był mikroskop sił atomowych ale przedstawiono również metody polegające na nanoindentacji przy pomocy różnych wgłębników. Praca zawiera także opisy metod kalibracji mikroskopów AFM dla różnych zastosowań badawczych oraz różnych parametrów mierzonych. Kalibracja taka jest trudnym zadaniem z uwagi na znaczny rozrzut parametrów sond, w tym fabrycznych. Przedstawiono także opisy wzorców używanych w procesach kalibracji. Szkoda że w opisach metod badawczych nie uwzględniono coraz bardziej popularnych metod analizy sygnałów otrzymanych z mikroskopu AFM pracującego w trybie kontaktu przerywanego (tappingu). Metody te stosowane są nie tylko na etapie prac badawczych ale zostały również implementowane w przemysłowo produkowanych mikroskopach. Metody te są szczególnie przydatne do badania powierzchni o złożonych strukturach n.p. kompozytów polimerowych oraz struktur biologicznych. Analiza sygnałów prowadzona w czasie rzeczywistym umożliwia uzyskanie map n.p. modułu Younga dla badanego elementu. Wydaje się że byłoby to szczególnie przydatne w przypadku badania protezy narządu słuchu.

Publikacja 5.

Dotyczyła próby modyfikacji powierzchni stalowych elementów konstrukcyjnych przez nałożenie warstw grafenowych. Warstwą pośrednią umożliwiającą związanie warstwy grafenowej ze stalą była miedź. Przedstawione wyniki pokazują znaczny wpływ warstwy miedzianej na właściwości próbki dotyczące twardości, tarcia, oraz modułu Younga. Wpływ nałożonej warstwy grafenowej był niestety znacznie słabszy. Ponieważ przeprowadzone badania prowadzone były w mikroskali i były fragmentem dużego i dobrze finansowanego projektu badawczego, należy w tym miejscu zadać pytanie czy Autorowi znane są rezultaty badań na elementach konstrukcyjnych z perspektywą praktycznych zastosowań.

Publikacja 6.

Poświęcona była zastosowaniu mikroskopu sił atomowych do badania właściwości elementów przydatnych w procesie rekonstrukcji ucha ludzkiego. Zastosowanie mikroskopu umożliwiło przeprowadzenie badań w zakresie drgań występujących w procesie naturalnej pracy ucha ludzkiego. Wydaje się że praca może mieć duże znaczenie w procesie protezowania elementów ucha. Badania procesów dynamicznych towarzyszących pracy elementów ucha sugerują także zastosowanie metod analizy sygnałów towarzyszących pracy AFM w trybie kontaktu przerywanego. Zdaję sobie sprawę ze zastosowanie tej metody przy użyciu sondy „kulkowej” wymagać będzie dostosowania systemu rejestracji do tej sondy. Jaką częstość rezonansową wykazują sondy używane przez Autora i czy było to mierzone?.

Publikacja 7.

Dotyczy bardzo istotnego z punktu widzenia technologicznego zagadnienia badania odrywania maski w procesie NIL. (litografia nanodrukowa). Celem lepszego zrozumienia procesu odrywania maski od podłoża powodującego częste uszkodzenia struktury p.Michałowski wraz z współpracownikami, w tym z Japonii, opracował model obliczeniowy przy czym dane do tego modelu uzyskano z przeprowadzonych pomiarów przy pomocy AFM z sondami kulkowymi. Wykorzystano również końcówki pokryte powłoką antyadhezyjną. Trudno jest przewidzieć jak dalece wyniki uzyskane z badań modelowych będą przydatne do ulepszenia procesu nanodruku . Pracują nad tym zagadnieniem różni producenci elementów elektronicznych.

Recenzowana praca stanowi niezbyt często spotykany przypadek połączenia trudnej pracy doświadczalnej z badaniami teoretyczno-obliczeniowymi. Doprowadziło to do ulepszenia szeregu metod badawczych. Uzyskane wyniki opublikowane zostały w czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Przeprowadzone obliczenia dotyczące współczynników bibliometrycznych również pokazały dobrą rozpoznawalność Autora i Jego prac zwłaszcza że publikacje zostały wydane w ciągu ostatnich czterech lat. Bardzo dokładnie oszacowano wkład pracy Doktoranta w opracowanie publikacji. Część polskojęzyczna rozprawy została zredagowana poprawnie. Nie mniej jednak

pojawiły się nazwy żargonowe n.p. zamodelowanie. Dało się również zauważyć drobne błędy w interpunkcji.

Podsumowując powyższe opinie, uważam że praca całkowicie spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie p. Michałowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Biorąc pod uwagę przesłane zasady wyróżnień prac na Wydziale Mechatroniki P.W., wnoszę o wyróżnienie pracy..

W. Olejnik