

Poznań, dn. 10.02.2023 r.

Dr hab. inż. Piotr Kuświk, prof. IFM PAN
Instytut Fizyki Molekularnej
Polskiej Akademii Nauk

**Recenzja opracowana w związku z postępowaniem w sprawie nadania stopnia doktora
habilitowanego dr. Dariuszowi Chocykowi w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w
dyscyplinie nauki fizyczne**

W marcu 2001 roku dr Dariusz Chocyk uzyskał stopień doktora nauk fizycznych w dyscyplinie fizyka (specjalność: fizyka ciała stałego) na Wydziale Fizyki i Techniki Jądrowej, Akademii Górniczo-Hutniczej. Promotorem pracy zatytułowanej „Niezwierniadlane rozpraszanie promieniowania rentgenowskiego w układach wielowarstwowych” był prof. dr hab. Grzegorz Gładyszewski. Obecnie Habilitant pracuje jako adiunkt w Katedrze Fizyki Stosowanej Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, a wcześniej był zatrudniony na stanowisku asystenta (1992-2003) i adiunkta (2003-2013) w Instytucie Fizyki Wydziału Podstaw Techniki Politechniki Lubelskiej. Przed obroną doktoratu opublikował 6 artykułów, a po doktoracie 48. Wszystkie te prace ukazały się w dobrych i bardzo dobrych czasopismach fizycznych, a do najważniejszych można zaliczyć Applied Surface Science, Scientific Reports, Journal of Alloy and Compounds. Ten dorobek wzbogaca współautorska monografia opublikowana po obronie pracy doktorskiej (wydawnictwo Springer) oraz polski patent (PL 237472 B1). Z dokumentacji przedstawionej do oceny wynika, że liczba punktów ministerialnych za prace opublikowane do 2018 roku (lista MNiSW za lata 2013-2018) wynosi 290 punktów, a w późniejszym okresie 1090 punktów (lista MNiSW/MEiN za lata 2019-2022). Według listy JCR sumaryczny impact factor (IF) wynosi 78,437 (zgodnie z rokiem opublikowania). Wspominane publikacje cytowane były 340 razy (299 bez autocytowań), a wskaźnik Hirscha wynosi 12. Parametry te nie są imponujące, w szczególności biorąc pod uwagę czas w jakim powstały. Natomiast należy zauważyć, że liczba cytowań w ostatnich latach znacząco wzrosła (np. w roku 2022 prace Habilitanta cytowane były 85 razy). To oznacza, że wyniki Jego badań są dostrzegane w środowisku naukowym. Podkreślić, należy również fakt, że niektóre z czasopism, w których publikował Habilitant, w znaczący sposób zwiększyło IF w ostatnich latach. Spektakularnym przykładem może być Applied Surface Science, które w roku 2001 miało $IF=1.068$, a obecnie ten parametr jest ponad sześciokrotnie wyższy i wynosi 6.707.

Ocena osiągnięć naukowych

Jako osiągnięcie naukowe zatytułowane „Naprężenia w metalicznych układach cienkowarstwowych”, będące podstawą wniosku o nadania stopnia doktora habilitowanego, dr Dariusz Chocyk przedstawił cykl dwunastu powiązanych tematycznie publikacji, które były cytowane 64.

W pracy [H1] przeprowadzona została analiza ewolucji naprężeń w trakcie termicznego naporowania warstw Cu na podłożu Si(001), które przed procesem osadzania czyszczone było stosując różne kombinacje odczynników chemicznych. Badano również zmiany naprężenia po zatrzymaniu osadzania warstw Cu. Wykazano, że sposób czyszczenia podłoża oraz prędkość nanoszenia silnie wpływają na zmiany naprężeń zachodzące podczas osadzania. W celu potwierdzenia wzrostu typu

Volmera-Webera (wzrost wyspowy), autorzy pracy zastosowali własny model symulacji osadzania warstw wykorzystujący metodę dynamiki molekularnej z możliwością obliczania naprężeń w czasie procesu osadzania. Obliczenia te potwierdziły ten typ wzrostu, a wysymulowana ewolucja naprężeń wykazała zmiany zbliżone do tych jakie wyznaczono z pomiarów. Tutaj należy zwrócić uwagę na pewną drobną nieścisłość w oświadczeniach współautorów. Mianowicie, dr D. Chocyk zadeklarował, iż wszystkie pomiary dyfrakcyjne zostały wykonane przez Niego, czego nie odzwierciedla oświadczenie dra hab. Tomasza Zientarskiego, który w nim wymienia również wykonanie pomiarów dyfrakcyjnych. Kontynuacja tych badań została przedstawiona w pracy [H7], w której naprężenia badano nie tylko dla Cu, ale również dla Ag po przerwaniu procesu nanoszenia. Wykazano, że w obu przypadkach warstwy są polikrystaliczne, a obserwowane zmiany naprężeń podczas nanoszenia i w trakcie przerw, można wyjaśnić uwzględniając dwa procesy: migrację atomów oraz koalescencję wysp atomów.

Zaproponowany model autorzy wykorzystali do opisu naprężeń i struktury krystalograficznej czterech różnych metali (Ag [H2], Cu i Fe [H3], Co [H4]) osadzanych na krystalicznym podłożu Au(001), a przypadku Co również na podłożu Cu(001) (praca [H4]). Na podstawie wysymulowanych rozkładów atomów obliczono rozkład natężenia refleksów w dyfraktogramie, co pozwoliło na bardziej precyzyjną analizę strukturalną badanych układów. Takie podejście jest niezwykle ważne dla opisu wzrostu warstw i określenia typu powstających w tym procesie naprężeń. Ciekawy wynik uzyskano dla układów Co/Au, w których wykazano współistnienie struktury fcc i hcp w układach polikrystalicznych. Jest to istotne, gdyż anizotropia magnetyczna warstwy Co silnie zależy od typu struktury krystalograficznej, a warstwy Co-hcp faworyzują prostopadłą anizotropię magnetyczną, która jest wykorzystywana w nowoczesnych zastosowaniach (np. do zapisu i przetwarzania informacji). To pokazuje, że badania prowadzone przez dra D. Chocyka są ważne zarówno z punktu widzenia badań podstawowych i związanych z aplikacjami. Szkoda jednak, że autorzy nie potwierdzili eksperymentalnie swoich wyliczeń, co znacząco uatrakcyjniło by ich rezultaty. Dr D. Chocyk określił swój procentowy udział w powstawaniu pracy [H2] na 25%, a dr hab. T. Zientarski na 75 % (praca dwuautorska). Może więc pojawiać się wątpliwość czy Habilitant odegrał wiodącą rolę w jej powstawaniu. Włączenie pracy [H2] do cyklu publikacji jest, moim zdaniem, uzasadnione ze względu na zbieżność tematyczną z pozostałymi pracami.

Wykorzystując symulacje dynamiki molekularnej w pracy [H5] badano proces osadzania cienkich warstw na krystaliczne podłoże zbudowane z ziaren o strukturze fcc(001). W badaniach tych symulowano nanoszenie różnych materiałów poprzez zmianę rozmiaru osadzanych atomów przy różnych odległościach pomiędzy zamodelowanymi ziarnami. Wykazano, że głównymi czynnikami wpływającymi na naprężenia w układach cienkowarstwowych są procesy powstawania dyslokacji i zmiana struktury krystalicznej ziaren (np. z fcc na hcp). Pokazano także, że rozmiar atomów odgrywa istotną rolę w indukowaniu naprężeń ściskających lub rozciągających.

W pracy [H6] badano zmiany naprężeń podczas przerywanego osadzania warstw Cu, Ag, Au na podłożu Si(001) w temperaturze pokojowej wykorzystując metodę skanowania powierzchni wiązką światła emitowanego z lasera. Metoda ta pozwala śledzić naprężenia w trakcie osadzania oraz podczas przerw w osadzaniu. Rejestrowane zależności pozwoliły pokazać, że dla warstw Cu i Ag o grubościach powyżej 20 nm występuje zmiana charakteru naprężeń w okresach przerw w nanoszeniu (naprężenie rozciągające przekształcają się w kierunku naprężeń ściskających), podczas gdy dla warstw Au takiej ewolucji nie zaobserwowano. Uzyskane wyniki omówiono w oparciu o model wzrostu Volmera-Webera, który pozwolił wyjaśnić różnice w charakterze wzrostu, a tym samym wyjaśnić rodzaj występujących naprężeń. Tutaj należy podkreślić, że Habilitant wspólnie z członkami swojego zespołu zaimplementował stosowaną metodę pomiaru nie tylko do aparatury próżniowej, w której prowadzono proces nanoszenia, ale także do układu wygrzewania próżniowego i osadzania elektrolitycznego oraz w urządzeniu do implantacji jonowej (Habilitant opracował i zaimplementował oprogramowanie służące do sterowania procesem wygrzewania i pomiaru promienia krzywizny próbki).

W pracy [H8] badano naprężenia w cienkich warstwach Cu o grubościach od 20-100 nm podczas ich wygrzewania. Zaobserwowano, że różnice naprężeń przed i po wygrzewaniu są większe dla grubszych warstw niż dla cieńszych. Pokazano, również że początkowo liniowa zależność naprężenia od temperatury zachowana jest do wyższych temperatur w przypadku cieńszych warstw. Analizowano dwa możliwe mechanizmy Coble i Nabarro-Herninga wyjaśniające uzyskane wyniki. Z przeprowadzonych obliczeń wywnioskowano, że stosując model Coble (mechanizm pełzania dyfuzyjnego po granicach ziaren) uzyskuje się dobrą zgodność z wynikami eksperymentalnymi. Na tej podstawie stwierdzono, że w przypadku warstw o grubościach poniżej 100 nm ten mechanizm jest odpowiedzialny za odkształcenia plastyczne wygrzewanych warstw miedzianych. Badania te zostały szerzej omówiony w autoreferacie. Szkoda, że wyniki tam pokazane nie znalazły się w publikacji, bo wzbogacają przedstawione wnioski. Choć tutaj mam uwagę dotyczącą zbyt lakonicznego wniosku wynikającego z pomiarów widm θ - 2θ dla warstwy Cu w stanie po naniesieniu i wygrzewaniu. Sprowadza się ona jedynie do stwierdzenia, że po wygrzaniu zmniejszyły się odległości międzypłaszczyznowe w kierunku prostopadłym do próbki (można mieć wątpliwość czy zmiana położenia refleksów dla Cu(200) jedynie o 0.01° wynika ze zmiany stałej sieci czy raczej z rozdzielczości prowadzonych pomiarów lub błędów pomiarowych). Tutaj należało by przeprowadzić pełniejszą analizę danych (np. określenie rozmiaru krystalitów czy stałych sieciowych), w oparciu o szeroką wiedzę Habilitanta w tym zakresie.

Prace [H9], [H10] i [H11] dotyczą określenia naprężeń w układach dwuwarstwowych, których grubości nie przekraczają 100 nm. W tych pracach badane były układy warstwowe Au/Cu, Cu/Au, Cu/Ag i Au/Ag nanoszone na podłoże krzemowe. W pracy [H9] badano naprężenia podczas nanoszenia układów o stałej grubości całkowitej dwuwarstwy (12 nm), ale z różną kombinacją grubości Cu i Au. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem warstw następuje wzrost naprężenia rozciągającego zarówno dla dwuwarstw Au/Cu, jak i Cu/Au, przy czym podczas osadzania warstwy Au na warstwie Cu następuje zmiana kierunku naprężenia w kierunku ściskania. Taka zmiana kierunku naprężeń nie występuje, gdy Cu nanoszone jest na Au, a wynik ten skorelowano z niedopasowaniem parametrów sieci oraz modelem wzrostu tych materiałów. Dodatkowo badano wpływ wygrzewania tych warstw na pojawiające się naprężenia. Dla wszystkich próbek zaobserwowano, silne zmiany naprężeń w trakcie pierwszego cyklu wygrzewania. Na podstawie zmian nachylenia elastycznej części krzywej naprężeń autorzy wskazują, że mogą one być związane ze zmianą współczynnika rozszerzalności cieplnej warstw metalicznych. Jako najważniejszy wynik pracy [H10] można zaliczyć wykazanie, że podczas pierwszego cyklu wygrzewania zachodzą nieodwracalne zmiany mikrostruktury w warstwach i zwiększa się chropowatość międzywierzchni co prowadzi do modyfikacji współczynników odkształcenia sprężystego warstw. Szkoda, że podobnie jak ma to miejsce w pracy [H11], autorzy nie przeprowadził symulacji widm reflektometrii rentgenowskiej, a jedynie skupili się na skromnym wniosku, że oscylacja intensywności zanika. Takie symulacje dostarczają wiele ważnych informacji (np. o kącie krytycznym, który w tym przypadku zmienia się drastycznie, czy o szorstkościach poszczególnych interfejsów), które wzbogaciły by wiedzę na temat tych układów.

Kontynuację badań dotyczących wygrzewania układów Au/Cu Habilitant przedstawił w pracy [H11], która jest pracą monoautorską przygotowana na konferencję „XXIII Conference on Applied Crystallography”. Zaobserwował, że podczas wygrzewania tego układu powyżej 150°C rozpoczyna się proces tworzenie stopu AuCu_3 (w abstrakcie pracy niewłaściwie tę fazę nazwano Au/Cu₃, ale traktuję to jako błąd edytorski). W pracy tej zabrakło omówienia korelacji wyników dotyczących naprężeń ze zmianami strukturalnymi, co w znaczący sposób wzmocniłoby uzyskane wnioski. W publikacji tej sformułowane wnioski nie są precyzyjne. Dla warstw Au wygrzewanie do 150°C prowadzi do wzrostu uporządkowania krystalicznego (wzrost intensywności refleksu Au(111)), przy jednoczesnym pojawieniu się nieporządku warstwy Cu (całkowity zanik refleksu Cu(111)), a pomiary reflektometrii nadal wskazują na obecność układu dwuwarstwowego, a nie stopu (Tabela I w pracy [H11]). Natomiast Autor we wnioskach pisze o nieuporządkowanej strukturze stopu po wygrzewaniu w tej temperaturze. W pracy [H11] na Rysunku 3 c) (niestety na rysunku w publikacji brakuje tego literowego oznaczenia) Autor niewłaściwie przypisał strukturę Au(111) do obserwowanego refleksu i nie dyskutuje dogłębnie uzyskanego w pracy wyniku. Wzmianka o nim pojawia się w autoreferacie, w którym ten refleks

powiązано z obecnością fazy $AuCu_3$. Pojawia się więc dodatkowe pytanie, skąd wynikają znaczące różnice położenia tych refleksów w przypadku temperatury wygrzewania równej $290^\circ C$ i $400^\circ C$. Być może są one wynikiem pojawiających się naprężeń w tym stopie.

W pracy [H12] przeprowadzono badania naprężeń podczas osadzania i wygrzewania układów składających się z trzech subwarstw, tj. $Au/Cu/Au$, osadzonych na podłożach krzemowych. Zaobserwowano, że podczas nanoszenia warstw występowały tylko naprężenia rozciągające. Po naniesieniu warstwy zostały trzykrotnie wygrzane do $400^\circ C$ i ochłodzone do temperatury pokojowej. Podczas tych procesów zmierzono naprężenia metodą skanowania wiązką światła emitowanego z lasera. Na ich podstawie stwierdzono, że już podczas pierwszego cyklu wygrzewania zachodzą nieodwracalne zmiany mikrostruktury warstw. Na podstawie analizy krzywej naprężeń (początek odchylenia od liniowej jej części) określono temperaturę, w której zachodzą odkształcenia plastyczne w warstwie Au i Cu , przy czym zakres odkształceń sprężystych nie zmieniał się wraz ze wzrostem grubości Cu . Pokazano, że kolejne cykle wygrzewania nie powodują większych zmian naprężeń w układach trójwarstwowych $Au/Cu/Au$.

Przedstawiony do oceny cykl 12 artykułów jest zbiorem prac powiązanych tematycznie, które dotyczą naprężeń w metalicznych układach cienkowarstwowych. Z przedstawionych oświadczeń współautorów wynika, że Habilitant pełnił wiodącą rolę w powstawaniu prac współautorskich. Wyjątkiem jest praca [H2], na co zwróciłem uwagę przy jej omawianiu.

Tematyka prac związanych z osiągnięciem jest istotna z punktu widzenia potencjalnych zastosowań takich warstw np. w elektronice. Poruszane zagadnienia fizyczne są również ważne z poznawczego punktu widzenia, gdyż wiele zaprezentowanych obserwacji eksperymentalnych, wspartych bardzo dobrze dobranymi symulacjami, pokazuje jak istotny jest odpowiedni dobór parametrów osadzania i wygrzewania układów warstwowych. Zaproponowane modele pozwalają zrozumieć przyczynę powstawania naprężeń w cienkich warstwach, a tym samym tak zaplanować proces ich wytwarzania, aby uzyskać pożądane właściwości fizycznych. Nie są to przełomowe prace otwierające nowe kierunki badań, ale stanowią ważny wkład w zakresie wiedzy dotyczącej wzrostu warstw i pojawiających się w nich naprężeń. Należy również podkreślić, że w dorobku nie objętym omówionych powyżej prac znajdują się publikacje, w których dr D. Chocyk widnieje jako wiodący autor (Jego udział przekracza 50%), a prace te stanowią również ważny wkład w zakresie badań właściwości mechanicznych układów warstwowych. Dorobek wzbogaca polski patent pt. "Sposób wytwarzania dwuwarstwowego pojemnika, zwłaszcza z papieru lub z folii polimerowej". W mojej ocenie dr D. Chocyk jest specjalistą w zakresie badań właściwości mechanicznych warstw metalicznych wykorzystującym zarówno eksperyment jak i modelowanie. Doskonały warsztat eksperymentatorski potwierdza udział w budowie aparatury naukowej, co w obecnych czasach jest rzadkością. Potrafi również trafnie interpretować uzyskane wyniki wspomagając się odpowiednim modelowaniem. O znaczeniu uzyskanych wyników świadczą również uzyskane w latach 2002-2015 nagrody przyznane przez Rektora Politechniki Lubelskiej oraz Akademi Rolniczej (choć z dokumentów nie wynika w jakim mieście znajduje się ta Akademia) za osiągnięcia naukowe. Są na tej liście głównie nagrody zbiorowe, ale warto podkreślić, że pojawia się również nagroda indywidualna dla dra D. Chocyka.

Podsumowując ocenę dorobku naukowego, należy stwierdzić, że dr Dariusz Chocyk spełnia wymagania ustawowe dotyczące posiadania w dorobku osiągnięć naukowych stanowiących znaczący wkład w rozwój dyscypliny nauk fizycznych.

Ocena aktywności naukowej

W autoreferacie dr D. Chocyk w punkcie dotyczącym swojej istotnej aktywności naukowej podał tylko 9 referatów wygłoszonych na zaproszenie w jednostkach naukowych w Polsce (7 referatów), Kosowie (1 referat) oraz Francji (1 referat). Pod koniec autoreferatu pojawiło się

uzupełnienie, w którym wymienione zostały ważniejsze prezentacje konferencyjne, choć niestety nie do końca wiadomo w jakiej formie były przedstawiane, jedynie przy jednej z nich pojawia się informacja, że był to referat przed obroną doktoratu. Informacja ta jest w znaczący sposób rozszerzona w wykazie osiągnięć, który zawiera wiele ważnych elementów aktywności naukowej Habilitanta. Podane zostały informacje o 4 referatach na konferencjach naukowych w Polsce i za granicą (Francja, Włochy), niestety nie jest jasno sprecyzowane czy referaty te zostały wygłoszone na zaproszenie organizatorów. Na podkreślenie zasługuje również duża aktywność Habilitanta przy realizacji projektów naukowych po obronie doktoratu. W jednym z nich był kierownikiem, a w 5 pełnił funkcje głównego wykonawcy lub uczestnika projekt. Były to 4 projekty krajowe (KBN, MNiSW) oraz 2 projekty we współpracy międzynarodowej (POLONIUM).

W trakcie swojej kariery naukowej odbył 6 staży w instytucjach naukowych (1x AGH, 5x Laboratoire TECSN, Universite d'Aix-Marseille), przy czym większość z nich realizowana była przed obroną pracy doktorskiej lub w krótkim czasie po niej, tj. do roku 2003. Z przedstawionej dokumentacji trudno określić czas trwania tych staży, gdyż pojawiają się tylko informacje o miesiącu i roku jego odbycia. Niestety nie odbył wyjazdów długoterminowych czy stażu podoktorskiego. Nie jest to zatem rozległa aktywność stażowa, w szczególności jeśli chodzi o wyjazdy zagraniczne.

Od 1993 roku jest członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego (PTF), a Jego aktywności nie ogranicza się do biernego udziału w tym gremium. O tym świadczy fakt, że już od 2010 roku aktywnie działa w Oddziale Lubuski PTF pełniąc rolę członka Komisji Rewizyjnej oraz członka zarządu tego oddziału. Nie brał udziału w zespołach eksperckich lub konkursowych.

Recenzował on także 39 publikacji dla uznanych czasopism naukowych oraz przygotował dwie opinie wydawnicze dla PWN. Wykonał 6 ekspertyz na zlecenie firm: GLOPACK Sp. z o.o. (3 ekspertyzy), ENCA TECHNOLOGY Sp. z o.o (2x), GUMET Sz. Geneja Spółka Jawna. Brał udział w pracach badawczo-rozwojowych w ramach projektu pt: „Wzrost konkurencyjności ENCA TECHNOLOGY Sp. z o.o. poprzez prace B+R nad systemem uplastyczniania tworzyw sztucznych z zachowaniem uniwersalności pomiędzy zastosowaniem materiałów PP i PET”, które finansowane były funduszy UE : Badania i innowacje.

Podsumowując, przedstawiony powyżej syntetyczny opis aktywności naukowej dra Dariusza Chocyka pokazuje, że wykazuje On istotną aktywność realizowaną w więcej niż jednej uczelni spełniając wymagania ustawowe.

Ocena osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych i popularyzujących naukę

Dorobek dydaktyczny jest imponujący. Są to liczne wykłady, ćwiczenia, laboratoria dla różnych kierunków studiów oraz przygotowane instrukcje do ćwiczeń czy opracowane sylabusy dla przedmiotu „Fizyka” i „Metody Matematyczne w Fizyce i Technice” na Politechnice Lubelskiej. Należy podkreślić, że część z tych aktywności dydaktycznych przeprowadzona była w języku angielskim i dotyczyła głównie studentów zagranicznych w ramach programu Erasmus. Był kierownikiem projektu „Wspomaganie Procesu Dydaktycznego Technologiami Informacyjnymi” realizowanego w Politechnice Lubelskiej (2005-2009) oraz pełnił funkcję wydziałowego koordynatora programu Erasmus (2008-2012). W latach 2009-2017 pięciokrotnie wizytował zagraniczne uczelnie we Francji, Słowacji, Portugalii i Kosowie w ramach programu ERASMUS. Dr D. Chocyk pełnił funkcję promotora w dwóch pracach magisterskich w latach 2014-2016. Równie bogata jest Jego aktywność popularyzatorska, do której należą prezentacje na festiwalach Nauki i Sztuki oraz na Pikniku Naukowym, wykłady promujące fizykę w szkołach średnich. Tutaj należy też wymienić koordynację działań Politechniki Lubelskiej z I Liceum Ogólnokształcącego w Chełmie oraz Liceum im. Jana III Sobieskiego w Lublinie. Jest to niezwykle

bogaty zbiór zajęć dydaktycznych i aktywności organizacyjnych i popularyzatorskich. To pokazuje, że dr D. Chocyk jest kreatywnym, aktywnym i zaangażowanym pracownikiem Politechniki Lubelskiej.

Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej ocenę osiągnięć naukowych, aktywności naukowej oraz dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego dra Dariusza Chocyka, stwierdzam że spełniają one wymagania ustawowe stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Piotr K...", written in a cursive style.