

dr hab. inż. Agata Jasik
Sieć Badawcza Łukasiewicz-Institut Mikroelektroniki i Fotoniki
al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa

Warszawa, dn. 31.01.2023 r.

RECENZJA

osiągnięcia naukowego i aktywności naukowej
dr. Dariusza CHOZYKA
w postępowaniu dotyczącym przyznania stopnia
dr. habilitowanego nauk fizycznych w dyscyplinie nauki fizyczne
prowadzonym
w Akademii Górniczo-Hutniczej na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej

- - -

1. Informacje ogólne

Podstawą do przygotowania niniejszej opinii jest pismo z dnia 14 grudnia 2022 r. od Pana prof. dr. hab. Janusza Wolnego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne w Akademii Górniczo-Hutniczej (AGH). W piśmie prof. dr. hab. J. Wolny informuje, że zostałam wskazana przez Radę Doskonałości Naukowej, a decyzją Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne w AGH - powołana na Recenzenta w postępowaniu habilitacyjnym dr. Dariusza CHOZYKA wszczętego w dniu 29 lipca 2022 r.

Opinia została sporządzona na podstawie dostarczonych następujących dokumentów:

- 1) kopii odpisu dyplomu nadania stopnia doktora nauk fizycznych,
- 2) autoreferatu w języku polskim,
- 3) autoreferatu w języku angielskim,
- 4) wykazu osiągnięć naukowych w języku polskim,
- 5) wykazu osiągnięć naukowych w języku angielskim,
- 6) oświadczeń współautorów opublikowanych prac naukowych,
- 7) kopii publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe.

2. Sylwetka Habilitanta dr. Dariusza CHOZYKA

W 1992 r. dr Dariusz CHOZYK ukończył studia na Wydziale Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie (WMiF, UMCS). W 2001 r., na Wydziale Fizyki i Techniki Jądrowej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie obronił pracę doktorską pt.: „*Niezwierniadlane rozproszenie promieniowania rentgenowskiego w układach wielowarstwowych*”. Od ukończenia studiów jest zatrudniony w Politechnice Lubelskiej, do 2013 r. na Wydziale Podstaw Techniki (Instytut Fizyki) na stanowisku kolejno asystenta i adiunkta, a następnie na Wydziale Mechanicznym (Katedra Fizyki Stosowanej) na stanowisku adiunkta.

Tematyka prac realizowanych przez Habilitanta po uzyskaniu stopnia doktora wpisuje się w ogólnoświatowy trend badań nad miniaturyzacją przyrządów półprzewodnikowych i złożonych układów mikroelektronicznych. Konieczność wytwarzania cienkich warstw metalicznych o rozmiarach nanometrowych oraz coraz wyraźniejsze odejście od aluminium w

mikroelektronice wyznaczyło kierunek prac Kandydata. Skupia się On na badaniach i charakteryzacji warstw metali ze szczególnym uwzględnieniem ewolucji naprężeń generowanych podczas procesów wytwarzania i obróbki termicznej. W szczególności współuczestniczy przy wytwarzaniu złożonych struktur metalicznych, ocenia jakość wielowarstw za pomocą mikroskopu sił atomowych AFM i dyfrakcji promieni rentgenowskich (typu θ - 2θ , ω) oraz wykonuje pomiar naprężeń i przeprowadza ich analizę wykorzystując do tego metodę $\text{Sin}^2\Psi$. Pomiar naprężeń przeprowadzany jest *in situ* za pomoc układu pomiarowego implementowanego do różnych urządzeń technologicznych przy udziale Kandydata. Ponadto w oparciu o uzyskane wyniki Habilitant opracowuje modele symulacji wzrostu układów cienkowarstwowych (metoda dynamiki molekularnej w układzie 3D) jak i ewolucji naprężeń w tych układach i przekłada je na język programowania.

Analiza dorobku Kandydata pokazuje, że prace są prowadzone systematycznie zaczynając od pojedynczych i kończąc na złożonych układach wielowarstwowych otrzymywanych na podłożach krzemowych. Za każdym razem jest to praca sekwencyjna oparta na wyniku pomiaru oraz symulacji zmierzającej do wyjaśnienia hipotezy opisującej zmianę naprężeń w czasie. Przeprowadzone badania tworzą spójną całość opisaną w cyklu publikacji zgłoszonych do oceny.

3. Ocena osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe przedstawione do oceny zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021, poz. 478 z późniejszymi zmianami) Habilitant przedstawił cykl powiązanych tematycznie publikacji pt.:

„Naprężenia w metalicznych układach cienkowarstwowych”

Zakres rozprawy habilitacyjnej został określony w podanym tytule. Cykl dwunastu (12) spójnych tematycznie publikacji powstał w przeciągu piętnastu (15) lat pracy naukowej (2005 r. – 2020 r.). Celem zdefiniowanym przez Habilitanta była analiza ewolucji naprężeń w wielowarstwowych układach metalicznych osadzanych na krzemowym podłożu podczas procesu osadzania oraz termicznej obróbki. O jakości nanowarstw a tym samym niezawodności złożonych przyrządów i układów mikroelektronicznych decydują zjawiska zachodzące na poziomie mikrostruktury materiału oraz w obszarach interfejsów/mikropowierzchni. Jednym z istotnych parametrów określających jakość jest naprężenie wygenerowane na drodze osadzania czy obróbki termicznej. By zrozumieć efekt końcowy, konieczne jest rozumienie dynamiki kształtowania się naprężenia. W tym też Autor upatruje swojego wkładu do dyscypliny nauki fizyczne. Analiza uzyskanych przez Habilitanta wyników została przedstawiona w poniższej tabeli. Prace zostały przeanalizowane w kolejności zaproponowanej przez Habilitanta w Autoreferacie. IF oznacza współczynnik wpływu czasopisma podany za Autorem, najprawdopodobniej adekwatny do roku publikacji, $\frac{TC}{TAC}$ oznacza liczbę cytowań (TC) do liczby autocytowań (TAC), natomiast U_H – udział własny Habilitanta w powstanie pracy podany w Autoreferacie. Liczba cytowań została określona przez Recenzenta na dzień 8.01.2023 r. na podstawie danych z bazy Web of Science.

Tabela 1. Analiza osiągnięć opisanych w ocenianym cyklu prac.

IF	$\frac{TC}{TAC}$	Komentarz Recenzenta dt. poszczególnych prac Habilitanta
0.833	$\frac{25}{3}$	[1]; D. Chocyk, T. Zientarski, A. Prószyński, T. Pieńkos, L. Gładyszewski, G. Gładyszewski, “Evolution of stress and structure in Cu thin films”, Crystal Research and Technology 40, (2005) 509-516.

$U_H = 55\%$

Praca wieloautorska, w której Kandydat jest pierwszym autorem. Praca przedstawia badania porównawcze naprężeń budowanych w trakcie osadzania warstw miedzi z różnymi szybkościami i na różnych podłożach. Konkluzje z pracy mówią o (1) większych naprężeniach rozciągających we wstępnym etapie osadzania dla cieńszych warstw osadzanych z większymi szybkościami, (2) o wpływie obróbki powierzchni podłoża na efekt końcowy naprężeń oraz (3) o większej zmianie naprężeń rozciągających dla grubszych próbek. W pracy zaproponowano model symulacji osadzania warstw i ewolucji naprężeń w trakcie procesu. Wyniki modelowania jakościowo odzwierciedlają wyniki eksperymentalne i pozwalają zrozumieć powiązania naprężeń z mikrostrukturą wzrostu.

Praca – na czas jej publikacji – miała charakter nowatorski. Znalazła oddźwięk w dziedzinie.

[2]; T. Zientarski, D. Chocyk, "**Strain and structure in nano Ag films deposited on Au: molecular dynamics simulation**", Applied Surface Science 306 (2014) 56-59.

$U_H = 25\%$

2.711 $\frac{8}{0}$ Praca dwuautorska. Praca ma charakter teoretyczny. Za pomocą symulacji metodą dynamiki molekularnej z oddziaływaniami opartymi na metodzie atomu zanurzonego w chmurze elektronów (*ang. Embedded Atom Method – EAM*) pokazano, że w warstwie srebra osadzonej na warstwie złota powstają – wbrew wzajemnej relacji stałych sieci - naprężenia ściskające, za które odpowiada zdefektowanie materiału. Największy udział przypisuje się obszarowi przypowierzchniowemu warstwy Ag.
Praca została zauważona w środowisku naukowym.

[3]; T. Zientarski, D. Chocyk, "**Structure and stress in Cu/Au and Fe/Au systems: A molecular dynamics study**", Thin Solid Films 562 (2014) 347-352.

$U_H = 50\%$

1.759 $\frac{9}{2}$ Praca dwuautorska. Praca ma charakter teoretyczny. Idea i schemat badań analogiczny jak w pracy [2], z tym że zamiast srebra wykorzystano miedź i żelazo. Symulacje wykazały odmienny charakter oddziaływania tych metali ze złotem. Miedź nie zaburzała rekonstrukcji Au i wykazywała cechy obecności naprężeń ściskających, natomiast żelazo odwrotnie, za wyjątkiem początkowej fazy osadzania. Autorzy zwrócili uwagę na brak zależności termicznej naprężeń dla badanych materiałów.

Liczba cytowań wskazuje na zainteresowanie środowiska tą pracą.

[4]; T. Zientarski, D. Chocyk, "**Stress induced grain boundaries in thin Co layer deposited on Au and Cu**", Applied Physics A, 122 (2016) 908-913.

$U_H = 70\%$

1.445 $\frac{5}{1}$ Praca dwuautorska. Praca jest kontynuacją (Co na Au) i zarazem rozszerzeniem (Co na Cu) badań opisanych w [3]. Obydwa układy materiałowe wykazują naprężenia ściskające w całym zakresie grubości ale z różną dynamiką zmian wartości bezwzględnych. Autorzy pokazują mikrostrukturę kobaltu w zależności

		<p>od materiału warstwy poprzedzającej. Powyżej pewnej grubości kobaltu osadzonego na Au obserwowana jest jego ziarnistość, natomiast kobalt na miedzi dopasowany jest do jej struktury. Analizy struktur dokonano za pomocą metody Acklanda-Jonesa wspomaganą analizą profili natężenia promieniowania rentgenowskiego. Stwierdzono, że anizotropowa relaksacja naprężeń jest odpowiedzialna za tworzenie się ziaren.</p> <p>Praca ma wymierny wpływ na dyscyplinę.</p>
1.920	$\frac{0}{0}$	<p>[5]; D. Chocyk, T. Zientarski, "The effect of size on structure and stress in grained films", <i>Materials Science and Technology</i> 36 (9) (2020) 966-971.</p> <p>$U_H = 75\%$</p> <p>Praca dwuautorska, w której Kandydat jest pierwszym autorem. Praca teoretyczna z wykorzystaniem symulacji dynamiki molekularnej i przy założeniu oddziaływań międzyatomowych Lennarda-Jonesa. Głównym celem pracy było sprawdzenie wpływu wielkości atomu osadzanego materiału na strukturę i naprężenie materiału podłoża. Większe atomy (o ok. 25%) powodowały zmiany strukturalne ziaren (z FCC na HCP) oraz anizotropowość relaksacji poprzez wspomniane zmiany struktury oraz generację dyslokacji.</p> <p>Artykuł nie został zauważony przez środowisko.</p>
1.389	$\frac{15}{8}$	<p>[6]; G. Gładyszewski, D. Chocyk, A. Prószyński, T. Pieńkos, "Stress development during intermitted evaporation of Cu and Ag on silicon", <i>Microelectronic Engineering Vol. 83</i> (2006) 2351-2354.</p> <p>$U_H = 70\%$</p> <p>Praca wieloautorska, eksperymentalna. Celem jej było zbadanie wpływu przerywanego osadzania warstw metali Cu, Ag Au na generowane w nich naprężenia. Zauważono, że 10 min przerwy we wzroście Cu i Ag skutkuje relaksacją naprężeń, które zmieniają się z rozciągających dla niewielkich grubości na ściskające w dalszym etapie osadzania. W przypadku Au brak jest relaksacji naprężeń, a wręcz zauważono sukcesywne ich budowanie.</p> <p>Praca została zauważona w środowisku naukowym.</p>
0.459	$\frac{5}{1}$	<p>[7]; D. Chocyk, A. Prószyński, G. Gładyszewski, T. Pieńkos, L. Gładyszewski, "Post-deposition stress evolution in Cu and Ag thin films", <i>Optica Applicata Vol. 35</i> (3) (2005) 419-424.</p> <p>$U_H = 60\%$</p> <p>Praca wieloautorska, w której Kandydat jest pierwszym autorem. Praca o charakterze eksperymentalnym. Autorzy zbadali ewolucję zmian naprężenia w warstwach Cu i Ag o różnych grubościach po zakończonym procesie osadzania. Stwierdzono, że warstwy miały budowę ziarnistą. W każdym przypadku zaobserwowano zmianę naprężeń w kierunku rozciągania niezależnie od grubości. Trend opisano funkcją wykładniczą dwuczłonową, przy czym każdy z członów powiązany z jednym procesem odpowiedzialnym za zmianę naprężeń: wypełnianie obszarów między ziarnami przez nadmiar atomów (proces szybki) i koalescencję wysp (proces wolny). Pierwszy z procesów dąży do zmniejszenia naprężeń ściskających (spadek potencjału chemicznego na powierzchni i</p>

		<p>migrację atomów na powierzchnię), a drugi - do budowania naprężeń rozciągających.</p> <p>Praca ma wymierny wpływ na dyscyplinę.</p>
1.583	$\frac{12}{5}$	<p>[8]; D. Chocyk, A. Prószyński, G. Gładyszewski, "Diffusional creep induced stress relaxation in thin Cu films on silicon", <i>Microelectronic Engineering</i> 85 (2008) 2179-2182.</p> <p>$U_H = 75\%$</p> <p>Praca trójautorska, w której Kandydat jest pierwszym autorem. Jej celem było zbadania ewolucji naprężeń w warstwach miedzi o różnej grubości podczas wygrzewania i studzenia struktury. Stwierdzono, że niezależnie od grubości układ nie wraca do stanu początkowego zawsze wykazując naprężenia rozciągające. Przeprowadzono obliczenia zakładając model dyfuzyjny zmian naprężeń w funkcji temperatury. Badania dyfrakcyjne pokazały, że po wygrzaniu warstwa miedzi jest polikrystaliczna o większych ziarnach i zredukowanej stałej sieci w kierunku normalnej do powierzchni.</p> <p>Praca ma zauważalny wpływ na dziedzinę.</p>
0.946	$\frac{2}{1}$	<p>[9]; D. Chocyk, A. Prószyński, G. Gładyszewski, "Effect of annealing on the mechanical behaviour of Au/Cu and Cu/Au bilayers on silicon", <i>Crystal Research and Technology</i> 45 (12) (2010) 1272-1276.</p> <p>$U_H = 75\%$</p> <p>Praca trójautorska, w której Kandydat jest pierwszym autorem. Zaprezentowano wyniki ewolucji naprężeń w układach dwuwarstwowych miedź/złoto o różnych grubościach podczas osadzania i wygrzewania. Zgodnie z informacją podaną przez Kandydata, opublikowane badania były pierwszymi tego typu w literaturze przedmiotu. Podczas osadzania układu dwuwarstwowego występowały tylko naprężenia rozciągające. W przypadku wygrzewania, w pierwszym jego cyklu zauważono pojawienie się odkształceń sprężystych (relaksacja), po czym przy temperaturze charakterystycznej dla relacji grubości warstw w układzie występowały odkształcenia plastyczne (naprężanie układu). Układ nie wrócił do stanu początkowego. W kolejnych cyklach początkowa i końcowa wartość naprężenia były zbliżone. Stwierdzono, że za relaksację/budowanie naprężeń odpowiedzialne są procesy dyfuzyjne wzdłuż międzypowierzchni bądź granic ziaren. Wnioski mają charakter ogólnych dla cienkich dwuwarstwowych układów metalicznych.</p> <p>Praca ma nieznaczny wpływ na dziedzinę.</p>
1.149	$\frac{1}{0}$	<p>[10]; D. Chocyk, A. Prószyński, G. Gładyszewski, "Stress evolution during annealing of Cu/Au, Cu/Ag and Au/Ag bilayers", <i>Journal of Nanoscience and Nanotechnology</i> 12 (11), (2012) 8647-8650.</p> <p>$U_H = 70\%$</p> <p>Praca trójautorska, w której Kandydat jest pierwszym autorem. Praca w swej strukturze przypomina pracę [9]. Traktuje o naprężeniach w binarnych układach zdefiniowanych w tytule podczas wzrostu i wygrzewania. Zgodnie z informacją podaną przez Kandydata, opublikowane badania były pierwszymi tego typu w literaturze przedmiotu. Uzyskane wyniki w swym charakterze przypominały</p>

wyniki uzyskane w pracy [9], za wyjątkiem otrzymanych dla układu Ag/Cu. Po pierwszym cyklu wygrzewania układ niemalże wrócił do stanu początkowego. Nie zaobserwowano trwałych zmian w warstwach (słabe mieszanie się atomów Ag i Cu).

Wpływ pracy na środowisko jest niezauważalny.

[11]; D. Chocyk, "Structure and stress in Au/Cu two-layer system during annealing at different temperature", Acta Physica Polonica A 130 (2016) 1118-1120.

U_H = brak danych

0.525 $\frac{0}{0}$ Praca monoautorska. Zgodnie z informacją podaną przez Kandydata, opublikowane badania były pierwszymi tego typu w literaturze przedmiotu. Kolejna praca z cyklu badań nad układem dwuwarstwowym. W tym przypadku zbadane zostały naprężenia w układzie Cu/Au o grubości warstw równej 15 nm każda, osadzonych z 1 min przerwą. Zbadano zachowanie naprężeń w trzech zakresach: do 150°C, do 290°C i do 400°C zaczynając od RT. Do 150°C wszystkie próbki wykazywały naprężenia ściskające, a powyżej – zmieniły kierunek ewolucji w stronę naprężeń rozciągających. Po wychodzeniu układ wygrzany do 290°C wrócił do stanu początkowego, co świadczy o odkształceniach elastycznych, natomiast ten wygrzany do 400°C wykazywał silne naprężenia rozciągające, co powiązано z plastycznym odkształceniem. Wnioski potwierdzono za pomocą badań dyfrakcyjnych – zaobserwowano pik od nowej fazy AuCu₃.

Wpływ pracy na środowisko jest niezauważalny.

[12]; D. Chocyk, A. Prószyński, "Stress evolution of Au/Cu/Au tri-layer systems during annealing", Applied Surface Science 260 (2012) 65-68.

U_H = 85%

2.112 $\frac{0}{0}$ Praca dwuautorska, w której Kandydat jest pierwszym autorem. Zgodnie z informacją podaną przez Kandydata, opublikowane badania były pierwszymi tego typu w literaturze przedmiotu (układ trójwarstwowo na Si). Zademonstrowano badania dla układu 5 nm Au/k nm Cu/5 nm Au, gdzie k = (5 ÷ 20) nm. Wraz z grubością osadzanych warstw budowały się naprężenia rozciągające. Jest to głównie zasługą różnicy stałych sieci. Łączenie się ziaren i napięcie powierzchniowe miało drugorzędne znaczenie. Wygrzewanie przeprowadzono w trzech cyklach dla każdej próbki o różnej grubości warstwy Cu. Tylko pierwszy cykl grzania wprowadzał zmiany – pozostałe przebiegały podobnie, zarówno grzanie jak i chłodzenie. Na tej podstawie wnioskowano, że procesy dyfuzyjne, które doprowadziły do zbudowania naprężeń rozciągających są dużo mniej efektywne w kolejnych cyklach. Ponadto zaobserwowano wzrost chropowatości na międzypowierzchniach w porównaniu do niewygrzanego materiału.

Wpływ pracy na środowisko jest niezauważalny.

Na podstawie szczegółowej analizy prac przedstawionych do oceny można stwierdzić, że:

- 1) zbiór dwunastu (12) artykułów tworzy monotematyczny cykl – poszczególne prace można odbierać jako kolejne rozdziały opracowania o ewolucji naprężeń w coraz to

bardziej złożonych układach warstw metalicznych osadzonych na krzemowych podłożach;

- 2) prace napisane są według tego samego schematu, co podkreśla metodyczność w dążeniu do skompletowania wiedzy na temat naprężeń w metalach podczas ich osadzania i obróbki termicznej;
- 3) widoczna jest monotematyczność i wąski zakres doboru technik pomiarowych, co jest mankamentem pracy badawczej, niepotrzebnie wprowadzającym ograniczenia. W przypadku wielowarstwowych układów metali ważnych informacji dostarcza np. analiza oporności;
- 4) niektóre prace, a w szczególności traktujące o binarnym i trójskładnikowym układzie Au i Cu [9, 11, 12] mogą mieć potencjał komercyjny - wychodzą naprzeciw zapotrzebowaniu technologii układów scalonych stosowanych w szeroko rozumianej mikroelektronice;
- 5) w dziewięciu (9) pracach na dwanaście (12) ocenianych (75% prac) udział autocytoowań jest na poziomie mniejszym niż 20%;
- 6) w ośmiu (8) artykułach na dwanaście (12) ocenianych Kandydat jest albo jedynym albo pierwszym Autorem;
- 7) trzy (3) prace, mimo iż opublikowane już kilka lat temu, nie zostały zauważone przez środowisko naukowe (liczba cytowań równa 0, prace [5, 11, 12]). Możliwe jest, że wpływ na to miał raczej okrojony zakres metrologii niż atrakcyjność i ważność tematu.

Niektóre wnioski postawione w pracach przedstawionych do oceny są powieleniem tego, co już zrobiono w innych materiałach. Przykładem może być wpływ przygotowania podłoża na stan naprężeń. Jest to znany efekt zarówno w dielektrykach jak i półprzewodnikach. Nie ma powodu, dla którego miałby ten związek nie zachodzić. Podobnie jest jeśli chodzi o wpływ szybkości osadzania na naprężenia czy brak relaksacji w przypadku niepełnego pokrycia powierzchni w modzie wzrostu Volmera-Webera. Dyskusyjne, bądź co najmniej warte weryfikacji eksperymentalnej jest założenie o stałości naprężeń w warstwie międzypowierzchniowej Ag-Au podczas ich osadzania, tym bardziej, że Autorzy piszą o zaburzeniu rekonstrukcji w warstwie złota na skutek osadzania Ag. Jednakże prace zawierają również jednoznacznie cenne wyniki, zarówno w zakresie badań teoretycznych (symulacje) jak i eksperymentalnych.

Do najważniejszych osiągnięć Habilitanta można zaliczyć:

- 1) z symulacji – określenie wzajemnego oddziaływania struktur metali w układzie dwuwarstwowym podczas osadzania: na złocie miedź, żelazo lub srebro. Miedź nie zaburza rekonstrukcji złota i kontynuuje wzrost zgodnie z jej strukturą, srebro przeciwnie, kontynuując wzrost zgodnie z rekonstrukcją wyznaczoną przez warstwę złota. Największe zmiany wprowadzają atomy żelaza – zmieniają rekonstrukcję i strukturę na FCC, natomiast sama warstwa żelaza relaksowała poprzez zmianę struktury z FCC na BCC;
- 2) z eksperymentu popartego analizą teoretyczną – w układzie dwuwarstwowym Co na miedzi bądź złocie obserwuje się tylko naprężenia ściskające, które relaksują poprzez tworzenie mieszaniny Co i Cu o strukturach FCC i BCC w pierwszym przypadku i tworzenie ziaren o strukturze HCP i obszarów międzyziarnowych o strukturze FCC;
- 3) z eksperymentu – podobieństwo ewolucji naprężeń podczas przerywanego osadzania warstw Cu i Ag w przeciwieństwie do statycznego zachowania naprężeń w osadzanych warstwach Au. Przerwy powodowały silną relaksację naprężeń i ich powrót do poprzedniej wartości po wznowieniu osadzania.

- 4) z eksperymentu popartego analizą teoretyczną – identyfikacja dyfuzji po granicach ziaren typu Coble jako głównej przyczyny odkształceń plastycznych występujących podczas wygrzewania warstw Cu o grubości poniżej 100 nm.
- 5) z eksperymentu – w układach dwuwarstwowych złoto na miedzi bądź trójwarstwowych typu Au/Cu/Au jeden cykl wygrzewania do temperatury 400°C jest wystarczający do uzyskania termomechanicznej stabilności. Na podstawie krzywej ewolucji można określić temperaturę, w której rozpoczyna się relaksacja plastyczna. Powyżej 290°C powstaje faza AuCu₃ zaobserwowana dla dwuwarstwowego układu.

W ośmiu (8) z dwunastu (12) ocenianych prac Kandydat jest pierwszym autorem. We wszystkich pracach wieloautorskich (11 na 12 ocenianych) udział Habilitanta jednoznacznie definiują oświadczenia współautorów, na podstawie których można stwierdzić, że jego rolą było opracowanie sposobu i metodyki pomiaru naprężeń i oceny jakości krystalograficznej oraz analiza uzyskanych wyników, co pozycjonuje go w roli wiodącej bądź znaczącej dla powstania danego utworu. Udział procentowy Habilitanta w powstaniu prac przedstawionych do oceny, zadeklarowany subiektywnie, nie budzi żadnych zastrzeżeń. Mieści się w przedziale od ok. 50% [1, 3] do 100% [11]. W ośmiu (8) pracach [4, 5, 6, 8 – 12] udział Habilitanta jest równy 70% lub wyższy. Tylko w jednej pracy udział Habilitanta jest niższy i wynosi 25% [2]. Z lektury oświadczeń współautorów wynika, że udział własny Autora w powstaniu prac został oszacowany w sposób nie budzący zastrzeżeń i w większości z nich jest znaczący. Innym zagadnieniem jest wpływ dorobku, a w tym osiągnięcia Kandydata na dyscyplinę nauki fizyczne. Liczba cytowań prac wymienionych w osiągnięciach Autora wynosi 82, bez autocytowań – 21 (na podstawie danych z bazy WoS zaczerpniętych przez Recenzenta dnia 8.01.2023). Prace zostały opublikowane na przestrzeni 17 lat. Na tej podstawie należałoby stwierdzić, że osiągnięcie przedstawione do oceny nie ma znaczącego wkładu w rozwój uprawianej przez Niego dyscypliny. Jednakże ugruntowana wiedza na temat układów metalicznych, w szczególności Au/Cu jest cenna już dziś, a biorąc pod uwagę, że w perspektywie układów scalonych i mikroelektroniki odczytowej wytwarzanych w skali produkcyjnej jest zmiana technologii bazującej na aluminium na technologię miedzianą, prawdopodobne jest, że wkład Jego dorobku w uprawianą dziedzinę będzie coraz bardziej zauważalny. Kandydat posiadał tę wiedzę i metodycznie ją rozwija. W tym należy upatrywać znaczenia jego osiągnięcia w dyscyplinie.

Podsumowując powyższe, należy stwierdzić, że zbiór artykułów przedstawionych do recenzji tworzy spójny monotematycznie cykl. Prace mają charakter przede wszystkim eksperymentalny (naukowo-badawczy), w mniejszym stopniu teoretyczny. Niektóre prace noszą znamiona aplikacyjności. Na podstawie analizy wyników prac można jednoznacznie wskazać osiągnięcia Autora (pkt. 1-5 powyżej), którego myślą przewodnią jest zrozumienie mechanizmów rządzących ewolucją naprężeń w warstwach metalicznych mierzonych *in situ* w procesach osadzania i wygrzewania. I to osiągnięcie ma wpływ na rozwój dyscypliny w aspekcie istotności zagadnień podejmowanych do zbadania i wyników osiągniętych w tym zakresie.

4. Ocena istotnej aktywności naukowej:

a) realizowanej w więcej niż jednej instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej - bazuje na wykazanych przez Kandydata referatach, które wygłosił na zaproszenie instytucji goszczącej w jej siedzibie. Po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych w okresie od 2001 r do 2018 r. Kandydat wygłosił osiem (8) referatów (pierwszy z dziewięciu (9) referatów wymienionych w Autoreferacie nosi datę sprzed nadania stopnia przez Radę Wydziału). Dwa (2) z tych ośmiu (8) referatów pozostają tematycznie powiązane z pracą doktorską, a pozostałe sześć (6) dotyczą tematyki ewolucji naprężeń w warstwach metalicznych. Średnio jest to jeden (1) referat na dwa lata.

b) dydaktycznej - Kandydat prowadził w języku polskim i angielskim. W języku ojczystym były to wykłady (cztery (4) pozycje tematyczne), w tym prowadzone przez wiele semestrów. W dorobku znajduje się również prowadzenie ćwiczeń i przygotowanie materiałów do nich oraz laboratoriów. Ponadto Kandydat wykazał opracowanie sylabusów z fizyki (cztery (4) opracowania) i z matematyki (jedno (1) opracowanie). W języku angielskim prowadził wykłady dla studentów zagranicznych w Politechnice Lubelskiej jak i w jednostkach zagranicznych (Politechnika w Lizbonie, Politechnika Słowacka). Był również promotorem dwóch prac magisterskich, jednej w j. angielskim.

c) popularyzacja nauki - w dorobku Kandydata znajdują się prezentacje festiwalowe (trzy (3) prelekcje), wykłady dla uczniów szkół średnich (cztery (4) szkoły), wieloletnia koordynacja działań promujących współpracę Politechniki Lubelskiej z liceami (2011 – 2017).

Kandydat wykazał pięć (5) nie przekraczających miesiąca pobytów w uczelniach zagranicznych w ramach programu ERASMUS (Francja, Słowacja, Portugalia, Republika Kosowo).

d) nagrody - Kandydat był siedmiokrotnie nagradzany przez Rektora Politechniki Lubelskiej za osiągnięcia naukowe oraz w 2012 r. za osiągnięcia organizacyjne i w latach 2018/2019 za osiągnięcia dydaktyczne.

e) w dorobku Kandydata znajdują się również prezentacje konferencyjne, w tym tych ważniejszych Kandydat wymienia trzydzieści (30), przy czym osiem (8) z nich zostało wygłoszonych przed obroną pracy doktorskiej. Kandydat publikował również wyniki swojej pracy w czasopiśmie o zasięgu krajowym, np. w *Elektronice*.

Podsumowując, osiągnięcia dra Dariusza CHOZYKA w zakresie aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej instytucji naukowej, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 3 Ustawy, dorobku dydaktycznego, popularyzatorskiego oraz organizacyjnego, spełniają w ogólności wymagania stawiane osobom ubiegającym się o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

5. Osiągnięcia naukowe albo artystyczne, stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne

I. WYKAZ OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH ALBO ARTYSTYCZNYCH, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1. PKT 2 USTAWY

Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy Osiągnięcie Kandydata składa się z dwunastu (12) powiązanych tematycznie artykułów naukowych. Pozytywnej oceny osiągnięcia dokonano na stronach poprzedzających.

II. WYKAZ AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ ALBO ARTYSTYCZNEJ

1. Opublikowane monografie naukowe (z zaznaczeniem pozycji niewymienionych w pkt I.1). Nie zostały wykazane przez Kandydata

2. Opublikowane rozdziały w monografiach naukowych.

Współautorstwo w jednej monografii dotyczącej odnawialnych źródeł energii, a zatem nie powiązanej tematycznie z osiągnięciem naukowym Kandydata.

3. Członkostwo w redakcjach naukowych monografii.

Nie zostało wykazane przez Kandydata

4. Opublikowane artykuły w czasopiśmie naukowych (z zaznaczeniem pozycji niewymienionych w pkt I.2).

Kandydat wykazał łącznie pięćdziesiąt dwie (52) pozycje artykułów opublikowanych w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym z listy JCR (wątpliwość jest odnośnie czasopisma *Solid State Phenomena*, w którym Kandydat opublikował trzy prace (poz. 25, 2010 r., poz. 30,

31, 2013 r.) i osiem (8) w czasopiśmie o zasięgu lokalnym (dwa (2) artykuły, poz. 32 i 35 w *Wykazie osiągnięć naukowych albo artystycznych* ..., str. 14, 15 w j. polskim; sześć (6) artykułów w *Autoreferacie*, str. 55). Liczba artykułów opublikowanych po otrzymaniu stopnia doktora nauk fizycznych wynosi 48. Czasopismo o najwyższym IF równym 5.324, w którym opublikowana została jedna praca to *Materials Science & Engineering A*. W czasopiśmie o IF powyżej 2.0 opublikowano dwanaście (12) z pięćdziesięciu czterech (54) indeksowanych prac, czyli 22%. Prac, w których udział Autora jest równy 50% i więcej jest 21, czyli 38%. Prace te zostały w większości opublikowane w czasopiśmie o $IF \geq 1.0$. Prac, w których Kandydat jest pierwszym autorem jest piętnaście (15). Powstały one w okresie od 1996 r. do 2022 r. Oznacza to, że Kandydat publikuje średnio jedną (1) pracę na dwa lata. Biorąc pod uwagę technologiczny charakter prac, taki wynik można uznać za zadawalający.

5. Osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne (z zaznaczeniem pozycji niewymienionych w pkt I.3).

Nie zostały wykazane przez Kandydata

6. Publiczne realizacje dzieł artystycznych (z zaznaczeniem pozycji niewymienionych w pkt I.3).

Nie zostały wykazane przez Kandydata

7. Wystąpienia na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych lub artystycznych, z wyszczególnieniem przedstawionych wykładów na zaproszenie i wykładów plenarnych.

Kandydat wykazał trzy (3) wystąpienia na konferencjach międzynarodowych i jedno na krajowej bez wskazania rodzaju zaproszenia.

8. Udział w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych, z podaniem pełnionej funkcji.

Kandydat był członkiem Komitetu Organizacyjnego XLI Zjazdu Fizyków Polskich w Lublinie w 2011 r.

9. Uczestnictwo w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych, z podziałem na projekty zrealizowane i będące w toku realizacji, oraz z uwzględnieniem informacji o pełnionej funkcji w ramach prac zespołów.

Kandydat uczestniczył w realizacji trzech rodzajów projektów: dwóch (2) projektów finansowanych przez KBN w roli głównego wykonawcy, dwóch (2) finansowanych przez MNiSW w roli kierownika i głównego wykonawcy oraz w dwóch (2) projektach POLONIUM jako uczestnik projektu. Na podstawie przytoczonych przedziałów czasowych należy sądzić, że wszystkie projekty zostały zakończone.

10. Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych wraz z informacją o pełnionych funkcjach.

Od 1993 r. Kandydat jest członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego (PTF). Pełnił w nim funkcję członka Komisji Rewizyjnej Oddziału Lubelskiego PTF w latach 2010 – 2011 oraz członka Zarządu Oddziału Lubelskiego PTF w latach 2014 – 2015, 2016 – 2017 i 2018 – 2020. Od 2022 r ponownie pełni funkcję członka Komisji Rewizyjnej.

11. Staże w instytucjach naukowych lub artystycznych, w tym zagranicznych, z podaniem miejsca, terminu, czasu trwania stażu i jego charakteru.

Kandydat sześciokrotnie (6) wyjeżdżał na staże naukowe, w tym pięciokrotnie (5) na staż zagraniczny (Francja) w ramach współpracy naukowej bądź realizacji projektu POLONIUM.

12. Członkostwo w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism wraz z informacją o pełnionych funkcjach (np. redaktora naczelnego, przewodniczącego rady naukowej, itp.).

Nie zostało wykazane przez Kandydata

13. Recenzowanie prac naukowych lub artystycznych, w szczególności publikowanych w czasopismach międzynarodowych.

Kandydat jest aktywnym recenzentem prac nadsyłanych do publikacji w periodykach międzynarodowych. W okresie od 2005 r. do 2022 r. wykonał 39 recenzji i wydał dwie opinie wydawnicze. Najczęściej recenzował prace nadsyłane do *Journal of Applied Polymer Science* (dziewięć (9) pozycji).

14. Uczestnictwo w programach europejskich lub innych programach międzynarodowych.

Nie zostało wykazane przez Kandydata

15. Udział w zespołach badawczych, realizujących projekty inne niż określone w pkt. II.9.

Nie został wykazany przez Kandydata

16. Uczestnictwo w zespołach oceniających wnioski o finansowanie badań, wnioski o przyznanie nagród naukowych, wnioski w innych konkursach mających charakter naukowy lub dydaktyczny.

Nie zostało wykazane przez Kandydata

Podsumowując, więcej niż połowa analizowanych kryteriów oceny aktywności naukowej Kandydata została spełniona w sposób wyczerpujący. Zatem można uznać, że w zakresie AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ Habilitant spełnia oczekiwania stawiane Kandydatom do stopnia dr. habilitowanego.

III. WSPÓLPRA Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM

1. Dorobek technologiczny.

Nie został wykazany przez Kandydata

2. Współpraca z sektorem gospodarczym.

Kandydat brał udział w pracach badawczo-rozwojowych nad systemem uplastyczniania tworzyw sztucznych z zachowaniem uniwersalności pomiędzy zastosowaniem materiałów PP i PET realizowanym przez firmę ENCA TECHNOLOGY Sp. z o.o. Wielokrotnie prowadził też badania na zlecenia firm: GLOPACK Sp. z o.o. z Lublina oraz GUMET Sz. Geneja, Spółka Jawna z Kraśnika.

3. Uzyskane prawa własności przemysłowej, w tym uzyskane patenty krajowe lub międzynarodowe.

Kandydat jest współtwórcą patentu nr B1 237472, „Sposób wytwarzania dwuwarstwowego pojemnika, zwłaszcza z papieru lub z folii polimerowej”

T. Klepka, D. Chocyk

4. Wdrożone technologie.

Nie zostały wykazane przez Kandydata

5. Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania wykonane na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców.

Kandydat prowadził badania i sporządzał raporty na zlecenie firm zewnętrznych (czterokrotnie (4) dla GLOPACK Sp. z o.o., ENCA TECHNOLOGY, GUMET Sz. Geneja Spółka Jawna), wykonał analizę (jeden raz (1) dla ENCA TECHNOLOGY) i opiniował planowane nowe przedsięwzięcia (jeden raz (1) dla GLOPACK Sp. z o.o.).

6. Udział w zespołach eksperckich lub konkursowych.

Nie został wykazany przez Kandydata

7. Projekty artystyczne realizowane ze środowiskami pozaartystycznymi.

Nie zostały wykazane przez Kandydata

Podsumowując, Habilitant wykazał aktywność we WSPÓLPRACY Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM poprzez wykonywanie prac badawczych na rzecz firm zewnętrznych i opiniowanie nowatorskich rozwiązań. Ponadto jest współtwórcą jednego patentu.

IV. DANE NAUKOMETRYCZNE

1. Impact Factor (w dziedzinach i dyscyplinach, w których parametr ten jest powszechnie używany jako wskaźnik naukometryczny).

Podany przez Kandydata sumaryczny współczynnik wpływu według listy JCR obliczony zgodnie z rokiem publikacji wynosi 78,437.

2. Liczba cytowań publikacji wnioskodawcy, z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań. Wymienione prace, zgodnie z danymi podanymi przez Habilitanta i sporządzonymi na podstawie bazy Web of Science, były cytowane 340 razy (299 razy bez autocytowań). Liczba cytowań (bez autocytowań) publikacji z monotematycznego cyklu wynosi 64 (z autocytowaniami). Na dzień sporządzania recenzji było to 82 (bez autocytowań wynosi 61).

3. Indeks Hirscha.

Podany przez Kandydata współczynnik Hirscha h wynosi 12.

Podsumowując, dane bibliometryczne podane przez Habilitanta i kwantyfikujące jego dorobek są na poziomie osób ubiegających się o nadanie stopnia dr. habilitowanego.

Podsumowując osiągnięcia naukowe Kandydata inne niż wymienione w art. 219 ust. 1. pkt 2b i pkt.3 Ustawy należy stwierdzić, że mają one znaczny wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne. W poparciu powyższego stwierdzenia można przytoczyć wynik analizy aktywności naukowej Kandydata w różnych aspektach Jego pracy. Kandydat wykazał łącznie pięćdziesiąt dwa (52) artykuły opublikowane w czasopismach o zasięgu międzynarodowym (z listy JCR), jest współautorem jednej monografii oraz trzech wystąpień konferencyjnych na zaproszenie (bądź wykładów plenarnych). Habilitant pełnił rolę członka Komitetu Organizacyjnego XLI Zjazdu Fizyków Polskich, od 1993 r. jest członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego (PTF). Uczestniczył w realizacji sześciu projektów, w tym w roli kierownika. Odbył również staże naukowe, w większości zagraniczne. Kandydat jest aktywnym recenzentem prac naukowych publikowanych w czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Kandydat wykazał się również współpracą z otoczeniem przemysłowym. Brał udział w pracach badawczo-naukowych zleconych przez firmę zewnętrzną, wykonywał analizy i opinie na temat nowych produktów planowanych do wdrożenia do produkcji. Jest również współtwórcą patentu. Dane bibliometryczne Kandydata są na poziomie osób starających się o stopień dr. nauk fizycznych.

Wnioski końcowe

Cykl publikacji złożony z dwunastu (12) pozycji stanowi monotematyczną całość. Oceniane prace z cyklu ułożone w porządku zaproponowanym przez Habilitanta mogą stanowić rozdziały opracowania dotyczącego ewolucji naprężeń badanych in situ w procesach wzrostu bądź wygrzewania coraz to bardziej złożonych systemów metalicznych, począwszy od pojedynczej warstwy metalu osadzonej na podłożu krzemowym do wielowarstwowego układu. Na podstawie lektury prac można wskazać pięć (5) zasadniczych osiągnięć naukowych, zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych, wymienionych w recenzji na str. 7, 8. Dotyczą one określenia wzajemnego oddziaływania struktur metali w układzie dwuwarstwowym podczas

osadzania na warstwie złota warstwy miedzi, żelaza lub srebra (1), różnego mechanizmu relaksacji tego samego typu naprężeń w różnych układach dwuwarstwowych (2), różnic w ewolucji naprężeń obserwowanych podczas osadzania warstw Cu i Au i podobieństw z warstwami Ag (3), identyfikacji dyfuzji po granicach ziaren typu Coble jako głównej przyczyny odkształceń plastycznych występujących podczas wygrzewania warstw Cu o grubości poniżej 100 nm (4) oraz wykazanie, że w układach dwuwarstwowych Au/Cu lub trójwarstwowych Au/Cu/Au jeden cykl wygrzewania do temperatury 400°C jest wystarczający do uzyskania termomechanicznej stabilności (5). Osiągnięcia te są (bądź były w czasie ich publikacji) nowatorskie, a niektóre z nich noszą znamiona aplikacyjności. Warty podkreślenia jest fakt, iż Habilitant dostrzegł potrzebę prowadzenia badań w kierunku nakreślonym przez rozwój technologii układów mikroelektronicznych, w tym układów scalonych i konsekwentnie podąża w tym kierunku. Biorąc to pod uwagę, wpływ Jego osiągnięcia na dyscyplinę będzie się pogłębiał.

Liczba prac opublikowanych w indeksowanych czasopismach z bazy JCR, w których Habilitant jest pierwszym autorem (piętnaście (15)) nie jest mała, biorąc pod uwagę dwadzieścia jeden (21) lat pracy twórczej (2001 – 2022 r.), średnio jest to trzy (3) opublikowane prace na 4 lata, ale z drugiej strony Habilitant jest członkiem zespołu technologów, zatem równie ważnym wskaźnikiem Jego wpływu na dyscyplinę jest sumaryczna liczba prac z listy JCR równa 48 (po uzyskaniu stopnia dr.) i sumaryczna liczba cytowań równa 299 (bez autocytowań).

Pozytywnie należy ocenić również pracę dydaktyczną i organizacyjną Kandydata jak i współpracę z otoczeniem społecznym, a przede wszystkim gospodarczym. Wykazał prowadzenie badań odpowiadając na zapotrzebowanie firmy zewnętrznej, sporządzanie analiz i opinii o planowanych do wdrożenia produktach.

Uważam, iż monotematyczny cykl publikacji zgłoszony do oceny jako osiągnięcie naukowe pt. „*Naprężenia w metalicznych układach cienkowarstwowych*” jak i całość dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego stanowi znaczny wkład Autora w dziedzinę nauk ścisłych i przyrodniczych, a Pan dr Dariusz Chocyk spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2022.0.574).

