

## RECENZJA

Wniosku dr. inż. Witolda Chromińskiego w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego na podstawie Uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej nr 86/III/20025.

### 1. Podstawowe dane o kandydacie

Dr inż. Witold Chromiński jest absolwentem Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. W roku 2017 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie Nauk Technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa nadany przez Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej pt. „*Microstructural heterogeneities and their influence on precipitation phenomena in a severely deformed 6082 aluminium alloy*” napisaną pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Małgorzaty Lewandowskiej. Od 2017 roku jest zatrudniony na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej, najpierw na stanowisku asystenta, następnie od 2020 roku na stanowisku adiunkta. Od roku 2021 jest dodatkowo zatrudniony w Narodowym Centrum Badań Jądrowych Centrum Doskonałości NOMATEN na stanowisku specjalisty badawczo-technicznego.

### 2. Ocena osiągnięcia naukowego

Dr inż. Witold Chromiński przedstawił do oceny jako najważniejsze osiągnięcie cykl 10 publikacji z bazy JCR pod tytułem „*Projektowanie niejednorodności i jednorodności mikrostrukturalnych w stopach aluminium*”.

Wszystkie wymienione publikacje dotyczą badania mechanizmów odkształcania oraz ewolucji wielkości i orientacji ziaren w aluminium i jego stopów w procesach SPD (dużych odkształceń plastycznych). Na pewno tematyka jest bardzo ciekawa zwłaszcza z naukowego punktu widzenia o bardzo dużym potencjale badawczym. Rosnące zapotrzebowanie na materiały o lepszych właściwościach użytkowych i udoskonalonych technologiach wytwarzania inspirowało badaczy do poszukiwania nowych metod kształtowania materiału. Obiecujące wydają się te technologie, które wykorzystują duże odkształcenia plastyczne do rozdrobnienia mikrostruktury. Wymiary ultradrobnych ziaren uzyskanych tymi metodami są bardzo stabilne w podwyższonej temperaturze. Charakteryzują się one również połączeniem

dobrej odkształcalności z wysoką wytrzymałością. Trzeba zaznaczyć jednak, że pomimo dużego potencjału badawczego tych metod oraz oczekiwań w stosunku do materiałów wytwarzanych tymi metodami nie znalazły one wykorzystania na skalę przemysłową. Wymagają one więc dalszych badań i udoskonaleń. Najpopularniejszą metodą jest ECAP (Equal Channel Angular Pressing). W metodzie tej materiał jest cyklicznie przepychany przez matrycę z dwoma przecinającymi się kanałami i ulega odkształceniu ścinającemu. Dr inż. Witold Chromiński wykorzystał metody SPD do odkształcania aluminium i jego stopów w celu poznania mechanizmów dyslokacyjnych oraz zmian orientacji ziaren dla dużych i złożonych odkształceń.

Kandydat w pierwszej publikacji wymienionej w cyklu pt. *„Grain refinement in technically pure aluminium plates using incremental ECAP processing”* opublikowanej w Materials Science & Engineering A, w której jest pierwszym autorem, przedstawił nowe podejście do wytwarzania ultradrobnoziarnistych płaskich wyrobów z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody wyciskania kąowego (ECAP), które zostało nazwane przyrostowe I-ECAP. W przeciwieństwie do konwencjonalnego ECAP, przyrostowe I-ECAP działa w małych krokach, w których odkształcanie i podawanie materiału jest powiązane z dwoma różnymi narzędziami działającymi asynchronicznie. W badaniach zastosował osiem cykli odkształcania do technicznie czystego aluminium, z obrotem próbki o 90° wokół osi Z, co skutkowało dwoma pełnymi obrotami i skumulowanym odkształceniem równym 9,2. Wykazał, że rozdrobnienie ziarna w tych warunkach zachodzi bardzo wydajnie. Osiem cykli odkształcania skutkowało zmniejszeniem wielkości ziarna poniżej 500 nm i bardzo wysokim udziałem ziaren o małym kącie dezorientacji granic, wynoszącym około 80%. Przypisano to aktywacji różnych systemów poślizgu w kolejnych cyklach (dzięki rotacji próbki) oraz brakowi nadmiarowych odkształceń, co skutkuje wczesnym ukształtowaniem się równoosiowej mikrostruktury ziarna. Te dwie cechy potwierdzają, że przyrostowe I-ECAP jest jedną z najskuteczniejszych metod intensywnego odkształcania plastycznego pod względem rozdrobnienia ziarna i tworzenia szerokokątowych granic ziaren. Pewne zastrzeżenie można mieć do braku informacji na temat niejednorodności odkształceń w badanym procesie oraz o miejscu badań mikrostrukturalnych.

Kontynuacją przedstawionych badań była publikacji *„Evaluation of mechanical properties and anisotropy of ultra-fine grained 1050 aluminum sheets produced by incremental ECAP”* opublikowanej w Materials & Design, w której habilitant był drugim autorem. Przedstawiono w niej bardzo interesujące badania nad możliwością wytwarzania metodą I-ECAP materiałów do procesu tłoczenia w postaci prostokątnych płyt z technicznie czystego

aluminium 1050. Po 8 cyklach odkształcania płyty wykazują izotropię płaską i mają niezależne wartości granicy plastyczności i wytrzymałości od kierunku badania oraz dość równomierny rozkład mikrotwardości na grubości. Takie właściwości przypisano losowej teksturze powstającej podczas odkształcania i jednorodnej mikrostrukturze z ultradrobnymi ziarnami równoosiowymi we wszystkich trzech płaszczyznach płyty. Wartości parametrów opisujących zdolność do głębokiego tłoczenia są bardzo obiecujące, ponieważ wartość anizotropii maleje tylko nieznacznie wraz z kolejnymi cyklami odkształcania w I-ECAP i jest niezależna od kierunku badania. Pewne zastrzeżenia można mieć do faktu, że dr inż. Witold Chromiński nie porusza kwestii odkształceń granicznych, przecież materiał odkształcony w I-ECAP będzie charakteryzował się małymi wartościami, co ogranicza jego tłoczność.

W następnej publikacji pod tytułem „*Effect of Fiber Orientation on Microstructure and Texture Evolution During the Cold-Rolling of Al-Mg-Si Alloy*” opublikowanej w *Advanced Engineering Materials*, gdzie Habilitant jest pierwszym autorem, przedstawiony jest wpływ walcowania na zimno na ewolucję tekstury. Habilitant wykazał, że mechanizmy odkształcania odpowiedzialne za ostateczną mikrostrukturę zależą od początkowej orientacji ziaren. Na pewno są to wartościowe badania nad wpływem drogi odkształcania na możliwość sterowania właściwościami końcowymi wyrobów.

W kolejnej publikacji pod tytułem „*Mechanisms of plastic deformation in ultrafine-grained aluminium – In-situ and ex-post studies*” opublikowanej w *Materials Science & Engineering A*, w której dr inż. Witold Chromiński był pierwszym autorem, wykazał między innymi, że odkształcanie technicznie czystego aluminium 1050 poprzez wyciskanie hydrostatyczne prowadzi do powstania niejednorodnej mikrostruktury z dwoma głównymi składnikami tekstury  $\langle 001 \rangle$  i  $\langle 111 \rangle$  równoległymi do kierunku wyciskania. Eksperyment z odkształcaniem in-situ za pomocą mikroskopu TEM wykazał, że każdy rodzaj ziarna odkształcał się w inny sposób. W ziarnach  $\langle 001 \rangle$  stwierdzono wielokrotne przesunięcia dyslokacji w różnych płaszczyznach. Takie zjawisko prowadzi do modyfikacji układu dyslokacji w obrębie podziarna i zmian jego kształtu.

Publikację tę uważam za bardzo wartościową, świadczącą o bardzo dużej wiedzy Habilitanta w obszarze analizy mechanizmów dyslokacyjnych oraz obsługi mikroskopu TEM. Bardzo duże wrażenie robią uzyskane czytelne układy dyslokacyjne.

Kontynuacją tych interesujących badań odkształcania in-situ aluminium była kolejna publikacja „*The importance of microstructural heterogeneities in the work hardening of ultrafine-grained aluminum, studied by in-situ TEM straining and mechanical tests*” w czasopiśmie *Materials Science & Engineering A*, gdzie Habilitant był pierwszym autorem.

Przedstawił w niej wpływ drogi odkształcania na makrostrukturę i właściwości czystego aluminium. Wykazał on, że technicznie czyste aluminium odkształcone metodą wyciskania hydrostatycznego i technologią przyrostowego I-ECAP, charakteryzowało się zróżnicowaniem mikrostruktury pod względem granic ziaren, tekstury i rozmieszczenia lokalnych defektów. Zróżnicowanie to wpłynęło na zdolność do umocnienia odkształceniowego w próbie rozciągania. Przeprowadzono eksperymenty z odkształcaniem in-situ za pomocą mikroskopu TEM, aby uchwycić występowanie dyslokacji w obu próbach i powiązać je z różnymi wartościami wskaźników umocnienia odkształceniowego. Wykazał, że w przypadku materiału przygotowanego metodą wyciskania hydrostatycznego dominują dwie składowe tekstury  $\langle 001 \rangle$  i  $\langle 111 \rangle$ , natomiast materiał odkształcony techniką I-ECAP cechuje jednorodna mikrostruktura bez dominujących orientacji.

Intersujące badania przedstawił w kolejnej publikacji „*Microstructural response to compression deformation of ultrafine-grained aluminum with various microstructures*” w czasopiśmie Materials Science & Engineering A, gdzie Habilitant był pierwszym autorem, dotyczące niejednorodność mechanizmów odkształceń plastycznych w ultradrobnoziarnistym aluminium zależne od lokalnych zmian w mikrostrukturze – rozmieszczenia defektów i orientacji krystalograficznej.

Kontynuacją badań wyciskania hydrostatycznego była publikacja „*Enhanced strength and electrical conductivity of ultrafine-grained Al-Mg-Si alloy processed by hydrostatic extrusion*” opublikowana w Materials Characterization, w której zbadano wpływ wyciskania hydrostatycznego połączonego ze sztucznym starzeniem na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne i elektryczne stopu Al-Mg-Si 6101. Wykazano, że taka obróbka termomechaniczna jest skuteczną metodą wytwarzania długich drutów o ultradrobnoziarnistej mikrostrukturze (wielkość ziarna 300–400 nm) i podwyższonej wytrzymałości na rozciąganie ( $>330$  MPa) oraz przewodności elektrycznej (do 58% IACS).

W swoich badaniach nad stopami aluminium Habilitant zajmował się również procesem walcowania pakietowego ARB (Accumulative Roll Bonding). Wyniki z tych badań przedstawił w trzech publikacjach „*Influence of dislocation structures on precipitation phenomena in rolled Al-Mg-Si alloy*” Materials Science & Engineering A, „*Precipitation strengthening of Al-Mg-Si alloy subjected to multiple accumulative roll bonding combined with a heat treatment*” Materials & Design oraz „*Enhancing homogenous precipitation and strengthening effectiveness in AlCuMg alloy*”, Journal of Materials Research and Technology, we wszystkich wymienionych publikacjach dr inż. Witold Chromiński był pierwszym autorem. Prace te są bardzo interesujące dotyczą zbliżonej tematyki połączenia odkształcania plastycznego i obróbki

cieplnej, w celu zwiększenia efektu umocnienia wydzieleniowego w stopie AlCuMg. Uważam za bardzo wartościowe opracowanie przeróbki cieplno-plastycznej opartej na technice walcowania pozwalającej na zarodkowanie i wzrost faz umacniających w stopach AlCuMg na drodze przyspieszonej dyfuzji, skutkującej zwiększeniem efektu umocnienia wydzieleniowego.

Uważam, że przedstawiony cykl 10 publikacji jest spójny tematycznie i bardzo wartościowy. W większości publikacji Kandydat jest pierwszym autorem.

Pewne zastrzeżenia można mieć natomiast do tytułu cyklu publikacji „*Projektowanie niejednorodności i jednorodności mikrostrukturalnych w stopach aluminium*”. Nie do końca odzwierciedla on zawartość publikacji nie tylko, dlatego że badano oprócz stopów aluminium też czyste aluminium, ale najbardziej budzi wątpliwość słowo projektowanie. Oczywiście Habilitant badał niejednorodności i jednorodności mikrostrukturalne ale ich nie projektował. Brakuje też w tytule informacji o narzędziu czyli metodzie SPD - dużych odkształceń plastycznych. Uwaga ta oczywiście nie umniejsza wartości wymienionych publikacji.

Przedstawiony Autoreferat jest interesującym podsumowaniem wymienionych bardzo wartościowych 10 publikacji z położeniem nacisku na niejednorodność i jednorodność mikrostruktur. Można mieć jedynie zastrzeżenia do pewnych niejasnych sformułowań np. strona 24 „Ze względu na małą ilość źródeł emisji dyslokacji tworzenie zaawansowanych struktur wynikających z przecinania się dyslokacji jest mało prawdopodobne w ziarnach o rozmiarach poniżej 700 nm, czy strona 32, 33 „Wykazałem, że zastosowanie konwencjonalnego walcowania w przypadku stopu AlMgSi prowadzi przede wszystkim do utworzenia dużej gęstości dyslokacji nawet jeśli schemat odkształcenia został zaplanowany tak, aby zintensyfikować skutki odkształcenia plastycznego”.

Inne uwagi:

Opis do rys. 3 dotyczący anizotropii chyba jest niewłaściwy. Co to jest materiał doskonale anizotropowy.

Prosiłbym o odróżnienie słów odkształcenie i odkształcanie.

Wnioskuje że na rys. 7 przedstawiono naprężenia umowne, wówczas trudno porównywać wartości odkształceń całkowitych, gdyż dla wartości maksymalnego naprężenia dochodzi już do rozproszonej utraty stateczności. Również nie można porównywać „różnicy pomiędzy granicą plastyczności a wytrzymałością na zerwanie” dla obu materiałów, gdyż nie określono momentu ( kryteriów zerwania próbki) utraty stateczności materiałów.

Pomimo że dr inż. Witold Chromiński twierdzi „Prace naukowe z zakresu inżynierii materiałowej często skupiają się na finalnych właściwościach, nie poświęcając wystarczającej uwagi niuansom mikrostrukturalnym, które często są zależne od miejsca obserwacji i mogą się

między sobą rozróżnić”, brakuje informacji na temat miejsca pobrania próbek do badań, przecież zarówno w procesie wyciskania hydrostatycznego, jak i procesach SPD – I-ECAP, ARB odkształcenia w materiale są niejednorodne.

W przedstawionych wynikach badań nie znajduję potwierdzenia na stwierdzenie ze strona 27 „W obszarze tym dominują granice o dużym kącie dezorientacji (ok. 55°), których obecność jest widoczna na rozkładzie przedstawionym na Rysunku 9(a) (czarne słupki). Obszar ten jest odpowiedzialny za umocnienie materiału”.

Wszystkie wymienione publikacje prezentują bardzo wysoki poziom naukowy, zostały opublikowane w najlepszych czasopismach z inżynierii materiałowej takich jak: Materials & Design, Materials Science and Engineering, Materials Characterization, Metallurgical and Materials Transactions A. Są bardzo często cytowane i do przygotowania ich wykorzystano najnowsze techniki badawcze. Uważam za najciekawsze badania in-situ mechanizmów odkształcania czystego aluminium.

Przedstawione w publikacjach wyniki wnoszą duży wkład w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa, a w szczególności do analizy zjawisk mikrostrukturalnych zachodzących w aluminium i jego stopach podczas dużych odkształceń plastycznych dla różnych dróg odkształcania ze szczególnym uwzględnieniem mechanizmów dyslokacyjnych oraz zmian orientacji ziaren. Habilitant swobodnie porusza się w tych bardzo trudnych zagadnieniach. Uzyskane wyniki na pewno przyczynią się do lepszego zrozumienia tych zjawisk.

Dr inż. Witold Chromiński w autoreferacie wymienia również inne swoje ciekawe obszary badawcze, szczególnie wymieniłbym 2 obszary, które poparte są bardzo wartościowymi publikacjami. Pierwszy obszar to „*opisanie mechanizmów powstawania warstw tlenkowych w czasie korozji stopów Ti*”. Badania prowadzone przez Kandydata mają na celu dostarczenie analizy budowy warstwy tlenkowej, która pozwoli wnioskować na temat mechanizmów utleniania się powierzchni stopów tytanu w zależności od składu chemicznego, orientacji krystalograficznej czy odmiany alotropowej tytanu. Drugi obszar badawczy to „*analiza zniszczeń radiacyjnych w materiałach dla energetyki*” realizowany w Centrum Doskonałości NOMATEN dotyczy analizy zniszczeń radiacyjnych w materiałach narażonych na działanie plazmy oraz wysokoenergetycznych jonów. Habilitant za swoje największe osiągnięcie w tej dziedzinie uważa opracowanie metod analizy ilościowej defektów sieci krystalicznej (dyslokacji, pęcherzy, nanopustek) z wykorzystaniem metody transmisyjnej mikroskopii elektronowej.

Habilitant ma w dorobku 66 artykułów w czasopismach naukowych z czego większość z IF. Jego publikacje były według Web of Science cytowane – 971 (874 bez autocytowań) razy, indeks H wynosi 18, natomiast według Scopus 1076 (807 bez autocytowań) oraz H=19, świadczy to, że dorobek Kandydata jest bardzo znany i ceniony w kręgach specjalistów. Wyniki prowadzonych badań prezentował również na wielu międzynarodowych konferencjach.

Podsumowując osiągnięcie naukowe Kandydata należy stwierdzić, że najmocniejszą stroną jest zarówno ich nowatorski obszar dotyczący odkształcania aluminium i jego stopów w procesach dużych odkształceń plastycznych ale również bardzo zawansowane badania mikrostrukturalne przy wykorzystaniu najnowszych metod badawczych.

### **3. Aktywność naukowa realizowana w więcej niż jednej uczelni lub jednostce naukowej.**

Od roku 2021 dr inż. Witold Chromiński jest zatrudniony w Centrum Doskonałości NOMATEN jako specjalista badawczo-techniczny. Do jego głównych zadań należało utworzenie laboratorium transmisyjnej mikroskopii elektronowej, z uwzględnieniem zaprojektowania pomieszczeń i przeprowadzeniem procedury przetargowej, a następnie opieka nad nowo utworzonym laboratorium. Pracownia ta jest częścią Materials Characterization Group kierowanej przez dr hab. inż. Iwonę Jóźwik, prof. NCBJ. Obserwacje, które Habilitant prowadzi dotyczą w znacznej części charakteryzacji i analizy ilościowej defektów radiacyjnych powstałych w wyniku oddziaływania przyspieszonych jonów z metalami i ceramiką oraz identyfikacja mechanizmów umocnienia tych materiałów na potrzeby grupy prowadzącej symulacje komputerowe. W wyniku zadań badawczych, w których był zaangażowany, powstało 12 publikacji.

W ramach projektu Sonatina, którego był kierownikiem odbył 3 miesięczny staż w TEM Gemini Centre działającym przy Norwegian University of Science and Technology (NTNU), w roku 2021. Badania prowadzone skupiały się przede wszystkim na zastosowaniu ilościowych metod analizy obrazu w celu określenia kinetyki procesów wydzieleniowych stopach AlCuMg poddanych różnym procesom obróbki cieplno-plastycznej.

Pod koniec roku 2023 został laureatem stypendium wyjazdowego Ambasady Francji - France Excellence SSHN na miesięczny pobyt badawczy we francuskiej jednostce. Staż odbył w Chimie Paris Tech Structural Metallurgy Laboratory pod opieką dra Fana Suna. W ramach pobytu przeprowadził serię eksperymentów odkształcania plastycznego in-situ w transmisyjnym mikroskopie elektronowym.

#### 4. Inne osiągnięcia

Wymienię tylko według mnie najważniejsze osiągnięcia dr. inż. Witolda Chromińskiego

- Promotor pomocniczy pracy doktorskiej pt. „*Rozpad odkształconego plastycznie martenzytu  $\alpha'$  ( $\alpha''$ ) w stopie tytanu Ti-6Al-4V*” dr inż. Anna Baran-Sadleja.

- Kierownik 3 projektów finansowanych przez NCN takich jak PRELUDIUM, SONATINA oraz SONATA.

- Członkostwo w towarzystwach naukowych: Polskie Towarzystwo Mikroskopii, European Microscopy Society, Polskie Towarzystwo Materiałoznawcza.

- Organizacja konferencji naukowych: Członek komitetu organizacyjnego XVI International Conference on Electron Microscopy, wrzesień 2017, Udział w organizacji konferencji EMRS Fall Meeting w latach 2011-2013.

- Tworzenie wielu nowych laboratoriów naukowo-dydaktycznych.

- Wielokrotnie otrzymał Nagrodą JM Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe, w roku 2020 został laureatem Stypendium Ministra NiSW dla Wybitnych Młodych Naukowców, w roku 2018 został laureatem Stypendium START przyznawanym przez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej

#### 5. Konkluzja końcowa

Dr inż. Witold Chromiński przedstawił do oceny jako najważniejsze osiągnięcie cykl 10 publikacji z bazy JCR pod tytułem „*Projektowanie niejednorodności i jednorodności mikrostrukturalnych w stopach aluminium*”.

Przedstawione osiągnięcie wnosi wkład w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa zwłaszcza w obszarze analizy ewolucji mikrostruktury w aluminium i jego stopach dla dużych odkształceń plastycznych oraz wpływu obróbki cieplnej na końcowe właściwości z uwzględnieniem obserwacji in-situ. Autor swobodnie porusza się w zagadnieniach analiz mechanizmów odkształcania plastycznego.

Dr inż. Witold Chromiński prowadzi i prowadził dużą aktywność naukową w więcej niż jednej uczelni, posiada też aktywność organizacyjną dlatego stwierdzam, że spełnia On wymagania stawiane, w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, osobom ubiegającym się o nadanie stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa i wnioskuję o dopuszczenie Go do dalszych etapów postępowania w celu nadania stopnia doktora habilitowanego.

