

dr hab. inż. Dariusz Garbiec
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny
ul. Ewarysta Estkowskiego 6
61-755 Poznań

Poznań, 14 lutego 2024 r.

Recenzja
dorobku naukowego dr. inż. Marcina Krajewskiego
w związku ze wszczętym postępowaniem o nadanie stopnia doktora
habilitowanego

Podstawą formalną przygotowania niniejszej recenzji jest pismo Rady Doskonałości Naukowej z dnia 14 października 2023 r. (DRKN.Z2.400.139.2023) oraz Uchwała nr 9/H/2023 Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN z dnia 30 listopada 2023 r., otrzymane wraz z kompletem dokumentów dotyczących osiągnięć Habilitanta w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie: Inżynieria Materiałowa.

Recenzja została opracowana na podstawie złożonej przez Habilitanta dokumentacji, zawierającej wniosek o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i dyscyplinie inżynieria materiałowa, autoreferat oraz wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych wraz załącznikami, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny. Dokumenty zostały dostarczone w formie elektronicznej i papierowej.

CHARAKTERYSTYKA KANDYDATA

Obszar zainteresowań naukowych dr. inż. Marcina Krajewskiego wpisuje się w trendy badawcze w inżynierii materiałowej. Wśród zagadnień badawczych, którymi Habilitant zajmuje się we współpracy z innymi naukowcami zarówno z jednostki macierzystej jak i z innych instytucji, można wymienić wytwarzanie oraz charakteryzację mikro- i nanomateriałów multifunkcjonalnych z nastawieniem na materiały do magazynowania i konwersji energii elektrycznej (baterie litowo-jonowe, superkondensatory), nanomateriały magnetyczne i ich zastosowania w nanomedycynie, a także wykorzystanie technik optycznych do wyznaczania struktury oraz właściwości mechanicznych materiałów.

W dniu 19 września 2016 r. Pan Marcin Krajewski uzyskał stopień doktora nauk fizycznych w dyscyplinie fizyka na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Podstawą do nadania stopnia doktora była rozprawa doktorska zatytułowana „Structural and magnetic properties of iron nanowires, iron nanoparticles and multiwall carbon nanotubes covered by iron oxides”. Od 1 lipca 2016 r. po dziś dr inż. Marcin Krajewski jest zatrudniony w Zakładzie Mechaniki Materiałów w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie na stanowiskach: starszego laboranta, od 1 października 2017 r. asystenta i od 1 sierpnia 2020 r. adiunkta. Dr inż. Marcin Krajewski opublikował łącznie 40 artykułów naukowych indeksowanych w bazach Scopus lub Web of Science (6 przed uzyskaniem stopnia doktora i 34 po uzyskaniu stopnia doktora). Jego prace były według bazy Scopus

cytowane 344 razy (bez autocytowań – 286 razy), a jego indeks Hirscha wynosi według bazy Scopus – 9 (bez autocytowań – 8). Habilitant zaprezentował wyniki swoich prac naukowych na 14 konferencjach krajowych i międzynarodowych w formie posteru i referatu. Dr inż. Marcin Krajewski kierował jednym projektem naukowym finansowanym ze środków Narodowego Centrum Nauki oraz jednym projektem mobilnościowym w ramach porozumienia pomiędzy Polską Akademią Nauk, a Narodową Radą Nauki i Technologii Tajwanu. Habilitant jest także laureatem Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców na lata 2020-2023 oraz był wielokrotnie nagradzany Nagrodami I, II i III stopnia przez Dyrektora Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN. Jest także recenzentem renomowanych czasopism naukowych.

DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWA

Ocena osiągnięcia naukowego

Dr inż. Marcin Krajewski przedstawił do recenzji cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych zatytułowany „Wytwarzanie, charakteryzacja oraz zastosowanie nanomateriałów zawierających żelazo”. Na osiągnięcie habilitacyjne składa się cykl dziesięciu publikacji, w których udział Habilitanta jest znaczący, ponieważ we wszystkich z nich jest pierwszym i korespondencyjnym autorem, z czego jeden artykuł jest pracą samodzielną. Siedem z tych prac opublikowano w czasopismach indeksowanych w Q1 Scopus, z kolei trzy są z Q2 Scopus. W sześciu pracach współautorami są naukowcy z zagranicy.

Habilitant podzielił osiągnięcie naukowe na pięć komplementarnych części. W pierwszej z nich zatytułowanej „Wytwarzanie wielościennych nanorurek węglowych pokrytych tlenkami żelaza i ich zastosowanie jako elektrody w urządzeniach do magazynowania energii” w pracach [H1, H4] przedstawił wyniki badań dotyczące modyfikacji materiałów węglowych poprzez dołączenie tlenków metali przejściowych i zastosowanie ich jako elektrod w bateriach litowo-jonowych czy superkondensatorach, co oczywiście nie jest strategią nową, jednakże w opublikowanych przez niego pracach wprowadzono nowy element w procesie modyfikacji wielościennych nanorurek węglowych. Habilitant zmodyfikował znany proces osadzania tlenków metali na nanorurkach węglowych, polegający na wprowadzeniu organicznych grup funkcyjnych po to, aby stworzyć tzw. miejsca aktywne, w których będzie możliwe osadzanie tlenku. Proces ten prowadzi się poprzez utlenianie lub aktywację nanorurek węglowych, tj. ich kąpiel w temperaturze powyżej 100°C w stężonych kwasach nieorganicznych (np. kwas solny, kwas azotowy(V)). Natomiast Habilitant w swoich pracach utlenione już wielościenne nanorurki węglowe dodatkowo nasączył 25% wodnym roztworem amoniaku. Miało to za zadanie zwiększenie pH utlenionych nanorurek węglowych, dzięki czemu łatwiej było osadzić tlenki żelaza, które są zazwyczaj wytrącane z roztworu soli żelaza z wykorzystaniem roztworów alkalicznych (wodorotlenek sodu, woda amoniakalna). W publikacji [H1] Habilitant proces strącania prowadził przy użyciu NaOH w temperaturze 100°C. Otrzymane w ten sposób wielościenne nanorurki węglowe pokryte tlenkiem żelaza zostały oddzielone od roztworu poprzez odwirowanie, a następnie wysuszono je w suszarce laboratoryjnej. Z kolei w publikacji [H4] proces był prowadzony przy użyciu $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, a otrzymane wielościenne nanorurki węglowe pokryte tlenkiem żelaza zostały oddzielone od roztworu poprzez dekantację wspomaganą magnetycznie, po czym zostały wysuszone w suszarce próżniowej. Po przeprowadzeniu analizy strukturalnej i składu chemicznego za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej, spektroskopii Ramana oraz spektroskopii Mössbauera okazało się, że proces suszenia miał decydujący wpływ na to, jakie materiały zostały otrzymane. W pierwszym przypadku otrzymano

wielościennie nanorurki węglowe pokryte nanocząstkami $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, natomiast w drugim przypadku otrzymano wielościennie nanorurki węglowe pokryte nanocząstkami Fe_3O_4 . Pierwszy z wytworzonych nanokompozytów został przetestowany jako materiał anodowy dla baterii litowo-jonowych, natomiast drugi jako anoda w superkondensatorach. Biorąc pod uwagę wykorzystanie nanokompozytu $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-MWCNTs}$ jako materiału anodowego dla baterii litowo-jonowych, Habilitant zaobserwował, że pojemność otrzymanej elektrody kompozytowej była większa od pojemności anody opartej tylko na utlenionych wielościennych nanorurkach węglowych. Ponadto badany materiał anodowy charakteryzował się wysoką wartością tzw. pojemności nieodwracalnej, tj. pojemności związanej z wbudowaniem się litu na stałe w strukturę elektrody. Zjawisko to było obserwowane zarówno dla elektrody zbudowanej z nanokompozytu $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-MWCNTs}$, jak również utlenionych wielościennych nanorurek węglowych i było związane z wbudowywaniem się litu w bardzo długie nanorurki węglowe, z których uwolnienie litu było utrudnione. Z kolei nanokompozyt $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-MWCNTs}$ był wielokrotnie testowany jako materiał anodowy dla superkondensatorów. Najwyższa pojemność tej elektrody została zmierzona dla elektrolitu alkalicznego 1 M wodorotlenku potasu (KOH). Jednak badania przeprowadzone przez Habilitanta wykazały, że bardzo zbliżoną wartość pojemności elektrody można uzyskać stosując elektrolit obojętny, tj. wodny 1 M chlorek potasu, który jest bardziej bezpieczny dla środowiska niż wcześniej stosowane elektrolity alkaliczne. W pracy Habilitant wykazał także, że pojemność badanej elektrody stabilizuje się na poziomie 81% po 3000 cyklach ładowania-rozładowania przy gęstości prądu ładowania-rozładowania 1 A/g i jest większa niż dla poszczególnych elementów tworzących nanokompozyt. Ważną zaletą zaproponowanej procedury wytwarzania wielościennych nanorurek węglowych pokrytych tlenkami żelaza jest możliwość wyprodukowania dużej ilości materiału podczas jednego cyklu procesu. Proces nie wymaga stosowania wysokiej temperatury, atmosfery ochronnej lub próżni oraz surfaktantów lub środków kompleksujących, jak w przypadku innych metod osadzania tlenków żelaza na materiałach węglowych.

W drugiej części zatytułowanej „Wytwarzanie bimetalicznych nanostruktur drutopodobnych z użyciem zewnętrznego pola magnetycznego jako parametru reakcji chemicznej” w publikacjach [H2, H5, H6] dr inż. Marcin Krajewski przedstawił technologię wytwarzania amorficznych nanostruktur 1D żelazo-nikiel (Fe-Ni) i żelazo-kobalt (Fe-Co) o zmiennym składzie chemicznym. Nanomateriały te były otrzymywane za pomocą reakcji redukcji prowadzonej w zewnętrznym polu magnetycznym. Pole to było generowane poprzez zastosowanie dwóch równolegle ustawionych do siebie komercyjnych magnesów neodymowych w specjalnie zaprojektowanym przez Habilitanta uchwycie. Proces wytwarzania nanomateriałów Fe-Ni i Fe-Co prowadzono w szklanym reaktorze wypełnionym roztworem wodnym, zawierającym różne zawartości chlorku żelaza(II) (FeCl_2) i chlorku kobaltu(II) (CoCl_2) bądź chlorku niklu(II) (NiCl_2) zgodnie z opracowaną metodyką. Poprzez dobór odpowiednich proporcji jonów Fe^{2+} pochodzących z FeCl_2 i jonów $\text{Co}^{2+}/\text{Ni}^{2+}$ pochodzących z $\text{CoCl}_2/\text{NiCl}_2$ można było syntezować materiały o różnym składzie chemicznym. Wytworzone nanomateriały Fe-Co i Fe-Ni były charakteryzowane za pomocą wielu komplementarnych technik eksperymentalnych, w tym: skaningowej mikroskopii elektronowej, spektrometrii rentgenowskiej z dyspersją energii, fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii, transmisyjnej mikroskopii elektronowej, dyfrakcji elektronowej oraz spektrometrii strat energii elektronów. Na podstawie uzyskanych wyników badań Habilitant wykazał, że wytwarzane nanostruktury posiadały bardzo charakterystyczną budowę, tj. przyjmowały one strukturę łańcucha nanocząsteczek. Ponadto zaobserwowano, że powierzchnia syntezowanych nanomateriałów jest utleniona, najprawdopodobniej poprzez ich reakcję z tlenem pochodzącym z powietrza. Dlatego nanomateriały Fe-Co i Fe-Ni wykazywały strukturę typu rdzeń-otoczek. W trakcie badań wykazano również, że zastąpienie jonów żelaza Fe^{2+} przez jony Fe^{3+} nie pozwala na wytworzenie

bimetalicznych nanołańcuchów Fe-Co/Fe-Ni. W wyjaśnieniu tego faktu należy wziąć pod uwagę dwa czynniki: (i) wartości standardowych potencjałów reakcji redukcji dla ww. jonów oraz (ii) mechanizm wzrostu otrzymywanych nanomateriałów. Wartości standardowych potencjałów reakcji redukcji dla jonów żelaza są zupełnie różne i wynoszą odpowiednio -0,04 V dla jonów Fe^{3+} i -0,44 V dla jonów Fe^{2+} . Powoduje to, że reakcja redukcji jonów Fe^{3+} zachodzi szybciej niż reakcja redukcji jonów Fe^{2+} . Dlatego też do przeprowadzenia reakcji ko-redukcji jonów żelaza z jonami Ni^{2+} bądź Co^{2+} , których potencjały standardowe wynoszą odpowiednio -0,23 V i -0,28 V, konieczne jest użycie jonów Fe^{2+} . Pozwala to na wytwarzanie nanokrystalitów niklowych/kobaltowych nieco wcześniej niż nanokrystalitów żelazowych, które następnie łączą się i formują bimetaliczne nanocząstki poprzez rozdrabnianie lub proces starzenia Ostwalda. W tym zakresie opracowanie technologii wytwarzania nanołańcuchów Fe-Co/Fe-Ni za pomocą syntezy indukowanej polem magnetycznym jest pierwszym etapem tych badań. Otrzymane wyniki jednoznacznie wskazują, że syntezowane nanomateriały są stabilne w warunkach otoczenia, a metoda syntezy indukowanej polem magnetycznym jest obiecującym sposobem tworzenia łańcuchów nanocząstek Fe-Co/Fe-Ni, które nie tworzą gęstych aglomeratów.

W trzeciej części zatytułowanej „Wysokotemperaturowe utlenianie nanomateriałów zawierających żelazo” w publikacjach [H3, H7, H8] Habilitant skupił się na ważnym aspekcie, jakim jest stabilność termiczna nanomateriałów zawierających żelazo. Ponadto innym istotnym czynnikiem jest podatność tych materiałów na reakcję z tlenem. Związki zawierające Fe, Ni lub/ oraz Co są niezwykle wrażliwe na utlenianie w podwyższonej temperaturze nawet w atmosferze o niskiej zawartości tlenu. Biorąc tę kwestię pod uwagę, Habilitant przeprowadził serię wygrzewań nanocząstek żelaza oraz nanołańcuchów Fe-Co i Fe-Ni po to, aby sprawdzić ich podatność na reakcję z tlenem. Badane przez niego nanocząstki żelaza zostały syntezowane wykorzystując to samo stanowisko, którego użył w przypadku wytwarzania nanołańcuchów Fe-Co i Fe-Ni. Jedyną różnicą było to, że reaktor nie był wstawiony w uchwyt z magnesami. Ponadto chlorek żelaza(II) (FeCl_2) zastąpiono chlorkiem żelaza(III) (FeCl_3). Wytworzone nanocząstki żelaza zostały poddane wygrzewaniu w temperaturze od 200°C do 800°C. Proces ten prowadzono w przepływowym piecu rurowym w atmosferze argonu zawierającego śladowe ilości tlenu (<99%), aby uniknąć szybkiego i samorzutnego utleniania żelaza. Wykonane wygrzewanie tych nanocząstek doprowadziło do ich stopniowego utleniania, co wpłynęło na zmiany ich składu chemicznego oraz właściwości magnetycznych. Analizując wyniki pomiarów dyfrakcji rentgenowskiej, spektroskopii Ramana i transmisyjnej spektroskopii Mössbauera, Habilitant zaobserwował, że udział tlenków żelaza zaczyna wzrastać wraz ze wzrostem temperatury. Było to związane z progresywnym utlenianiem zachodzącym na powierzchni nanocząstek żelaza. Słaby sygnał pochodzący od krystalicznych tlenków żelaza (mieszaniny Fe_3O_4 i $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) został zarejestrowany dla nanocząstek wygrzewanych w temperaturze 200°C. W temperaturze między 300°C a 500°C udział Fe_3O_4 stał się wyraźniejszy, a w temperaturze 500°C zaobserwowano największy spadek zawartości żelaza. W temperaturze powyżej 500°C nastąpiła stopniowa przemiana Fe_3O_4 w $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Należy jednak zaznaczyć, że nanocząstki żelaza poddane obróbce w temperaturze 800°C nadal wykazywały obecność niewielkiej ilości Fe_3O_4 . Oznacza to, że badane nanocząstki nie zostały w pełni utlenione do $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ w temperaturze 800°C. Warto również zwrócić uwagę, że oddziaływania magnetyczne między tymi nanocząstkami spowodowały, że tworzyły one gęste aglomeraty, które były trudne do odseparowania nawet dla nanocząstek niepoddanych wygrzewaniu. Dlatego między nimi nie było pustej przestrzeni, co doprowadziło do ich częściowego spiekania zwłaszcza w podwyższonej temperaturze, a tym samym utrudniło to przeprowadzenie pomiarów metodami mikroskopii elektronowej. Zmiany składu chemicznego wygrzewanych nanocząstek żelaza wpłynęły również na zmianę ich właściwości magnetycznych. Habilitant zaobserwował, że wszystkie podstawowe parametry magnetyczne

wygrzewanych nanocząstek zmniejszały się wraz ze wzrostem temperatury między 200°C a 500°C. Dla nanocząstek wygrzewanych w temperaturze 600°C i wyższych wartości, właściwości były bardzo niskie, co wiązało się z rosnącym udziałem $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, który wykazuje bardzo słabe właściwości ferromagnetyczne. Natomiast wartość koercji znacząco wzrosła, co również było związane z dominującym udziałem $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ oraz ze spiekaniem wygrzewanych nanocząstek. Doprowadziło to do powstawania dużych aglomeratów składających się z wielu mniejszych nanocząstek tlenku żelaza. To z kolei wygenerowało dużą liczbę defektów, dyslokacji i naprężeń, które zwiększyły koercję dla nanocząstek wygrzewanych w wysokiej temperaturze. Podatność na reakcję z tlenem amorficznych wcześniej opisanych nanołańcuchów Fe-Co i Fe-Ni została także zbadana przez Habilitanta. Wygrzewanie prowadzono w szerokim zakresie temperatury do 800°C, jednak podobnie jak w przypadku nanocząstek żelaza wygrzewanie nanołańcuchów Fe-Co i Fe-Ni w temperaturze powyżej 600°C prowadziło do spiekania materiału. Stąd też Habilitant skupił się głównie na wygrzewaniu w temperaturze nieprzekraczającej 500°C. Nanołańcuchy Fe-Co były wygrzewane w 400°C w dwóch różnych atmosferach, tj. podobnie jak w przypadku nanocząstek żelaza w argonie zawierającym śladowe ilości tlenu (<99%) oraz w mieszaninie redukującej zawierającej 80% azotu i 20% wodoru. Natomiast nanołańcuchy Fe-Ni były poddane wygrzewaniu w temperaturze 400°C i 500°C w osuszonym powietrzu. Motywacją Habilitanta do wykorzystania dwóch różnych atmosfer podczas wygrzewania amorficznych nanołańcuchów była chęć zbadania ich zachowania w atmosferach powszechnie uznawanych za obojętne. Habilitant zaobserwował, że obróbka termiczna w argonie spowodowała krystalizację materiału do fazy bcc Fe-Co. Jednocześnie średnice nanołańcuchów Fe-Co poszerzyły się, a ich powierzchnie stały się bardziej chropowate na skutek tworzenia się mieszaniny tlenków CoFe_2O_4 i Fe_3O_4 . W przypadku nanołańcuchów $\text{Fe}_{0,25}\text{Co}_{0,75}$ zauważono, że zostały one pokryte powłoką tlenkową przypominającą nanopłatki, co stanowiła lepszą barierę przed utlenianiem niż gęste warstwy tlenkowe obserwowane w przypadku nanołańcuchów $\text{Fe}_{0,75}\text{Co}_{0,25}$ i $\text{Fe}_{0,50}\text{Co}_{0,50}$. Z kolei wygrzewanie przeprowadzone w mieszaninie azotu i wodoru spowodowało krystalizację fazy rdzeni żelazo-kobaltowych do postaci fazy bcc Fe-Co, a ich powłoki tlenkowe uległy rozkładowi w reakcji z wodorem. Warto również dodać, że poza fazą bcc Fe-Co nanołańcuchy $\text{Fe}_{0,25}\text{Co}_{0,75}$ wygrzane zarówno w atmosferze zawierającej argon, jak i wodór zawierały fazę hcp Co. Jak wspomniano wcześniej wygrzewanie nanołańcuchów Fe-Ni było przeprowadzone w 400°C i 500°C w osuszonym powietrzu. Po przeprowadzonych badaniach Habilitant zaobserwował, że obróbka termiczna tych nanostruktur prowadziła albo do ich transformacji z materiału amorficznego w materiał krystaliczny, albo do ich utleniania. Cechą decydującą o tym, który z wymienionych procesów dominuje i jak kształtują się właściwości morfologiczne, strukturalne oraz magnetyczne badanych nanołańcuchów Fe-Ni, jest zawartość żelaza w próbce oraz obecność zanieczyszczeń. Łańcuchy o składzie chemicznym $\text{Fe}_{0,75}\text{Ni}_{0,25}$ i $\text{Fe}_{0,50}\text{Ni}_{0,50}$ były bardziej wrażliwe na utlenianie niż materiał o składzie $\text{Fe}_{0,25}\text{Ni}_{0,75}$. W swojej pracy Habilitant zaobserwował także, że wygrzane nanołańcuchy $\text{Fe}_{0,75}\text{Ni}_{0,25}$ i $\text{Fe}_{0,50}\text{Ni}_{0,50}$ zostały pokryte nanocząstkami tlenkowymi, podczas gdy nanopłatki tlenków narosły na nanołańcuchach $\text{Fe}_{0,25}\text{Ni}_{0,75}$. Ponadto nanołańcuchy $\text{Fe}_{0,25}\text{Ni}_{0,75}$ zawierały niewielką ilość fazy Ni_3B , której obecność miała wpływ na lepszą odporność na utlenianie tego materiału.

W czwartej części zatytułowanej „Nanocząstki żelaza jako wypełniacz kopolimeru i ich zastosowanie w ekranowaniu podczerwieni” w publikacji [H9] Habilitant jako matryce do wprowadzenia nanocząstek żelaza dla materiałów ekranujących podczerwień zastosował kopolimer PVDF-HFP, który posiada doskonałą odporność chemiczną oraz jest nietoksyczny, lekki, hydrofobowy, stabilny termicznie i mechanicznie. Celem było stworzenie materiału ekranującego w bliskiej i średniej podczerwieni. Kopolimery, zarówno wypełnione jak i niewypełnione nanocząstkami żelaza, były

przygotowywane konwencjonalną metodą odlewania z roztworu polimeru. Pomiary dyfrakcji rentgenowskiej oraz spektroskopii Ramana wykazały, że wytworzone kopolimery są zbudowane głównie z fazy α -PVDF z niewielkim udziałem fazy β -PVDF, która zanika w przypadku folii wypełnionych nanocząstkami żelaza. Z kolei badania wykonane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego potwierdziły, że nanocząstki żelaza tworzą dobrze rozproszone aglomeraty w kopolimerze. Ponadto, transmitancja MIR i NIR niewypełnionej folii PVDF-HFP jest stosunkowo wysoka, podczas gdy jej współczynnik odbicia jest niski. Natomiast wprowadzenie nanocząstek żelaza do folii PVDF-HFP spowodowało, że zarówno transmitancja jak i współczynnik odbicia obniżyły się. Spadek współczynnika odbicia wypełnionych folii PVDF-HFP nie był jednak znaczący. Z kolei średni spadek transmisyjności podczerwieni dla folii wypełnionych przez 1, 2.5, 5, 10 i 50 mg nanocząstek żelaza wyniósł odpowiednio 13%, 24%, 31%, 77% i 98%. Uzyskane wyniki badań jednoznacznie pokazują, że właściwości ekranowania podczerwieni folii PVDF-HFP można kontrolować przez dodanie odpowiedniej ilości nanocząstek żelaza. Dlatego są one interesujące z punktu widzenia zastosowań antyrefleksyjnych i ekranujących podczerwień.

W piątej, ostatniej części zatytułowanej „Użycie nanołańcuchów żelazowych w oczyszczaniu wody z barwników syntetycznych” w publikacji [H10] Habilitant skupił się na bardzo poważnym problemie jakim jest zanieczyszczenie wody przez barwniki, które są toksyczne, rakotwórcze i/lub mutagenne. Jedną z najczęściej stosowanych metod ich eliminacji jest adsorpcja ze względu na jej wysoką wydajność, umiarkowane koszty eksploatacji, prostotę oraz możliwość usuwania skoncentrowanych form barwników. Warto także odnotować, że nanocząstki żelaza zerowartościowego (Fe_0 , nZVI) są uznawane za bardzo dobry materiał do usuwania zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych z wody. Jednak mają one tendencję do tworzenia aglomeratów, aby zmniejszyć swoją energię powierzchniową. Prowadzi to bezpośrednio do redukcji ich powierzchni aktywnej, a w konsekwencji do obniżenia ich właściwości sorpcyjnych. Wśród najczęściej stosowanych rozwiązań mających na celu ograniczenie tworzenia się aglomeratów nanocząstek wyróżnia się modyfikację ich powierzchni oraz ich osadzanie na różnych podłożach. Działania te są częściowo wystarczające, jednak budzą dodatkowe wątpliwości. Dlatego wciąż poszukiwane są nowe rozwiązania zapobiegające aglomeracji nZVI i zastosowania ich jako adsorbentów zanieczyszczeń. Jednym z nich jest zaproponowane przez Habilitanta zmiana kształtu/geometrii nanocząstek. Synteza indukowana polem magnetycznym umożliwia wytwarzanie nanołańcuchów zbudowanych z nanocząstek. Dlatego też Habilitant postanowił wykorzystać ten proces do produkcji nanołańcuchów żelaza zerowartościowego, a następnie wykorzystać je jako adsorbent rakotwórczych barwników – fioletu krystalicznego (barwnik kationowy) oraz czerwieni Kongo (barwnik anionowy). Użyte nanołańcuchy żelaza zerowartościowego wykazały dobre właściwości sorpcyjne dla obu badanych barwników. Ponadto przeprowadzone badania kinetyczne wykazały, że adsorpcja obu barwników podlegała modelowi pseudopierwszego rzędu, w którym stężenie adsorbentu jest stałe. Adsorpcja obu badanych barwników jest zgodna z modelem Temkina, natomiast model Redlich-Petersona może być również stosowany do opisu adsorpcji czerwieni Kongo. Korzystając z modelu Freundlicha Habilitant ustalił, że oba barwniki są adsorbowane na nanołańcuchy żelaza zerowartościowego poprzez chemisorpcję, ale w przypadku fioletu krystalicznego nie można wykluczyć także oddziaływań kulombowskich między barwnikiem a adsorbentem. Porównując wyniki badań Habilitanta z innymi stosowanymi wcześniej adsorbentami do oczyszczenia wody z użyciem fioletu krystalicznego oraz czerwieni Kongo, można zauważyć, że nanołańcuchy żelaza zerowartościowego wykazują wyższe lub porównywalne właściwości do innych materiałów sorpcyjnych opisanych w literaturze. Dlatego wydają się one być obiecującym materiałem do oczyszczania wód z barwników syntetycznych.

Podsumowując, przedstawiony w ramach osiągnięcia habilitacyjnego wkład dr. inż. Marcina Krajewskiego w rozwój inżynierii materiałowej polega na tym, że wykazał, iż tworzenie aglomeratów jest charakterystyczne dla wolnostojących nanocząstek zawierających żelazo [H3, H4, H9], jednak możliwe jest ich rozseparowanie poprzez osadzanie na podłożach takich jak np. wielościenne nanorurki węglowe [H1, H4] lub wytworzenie tzw. nanołańcuchów nanocząstek stosując syntezę indukowaną polem magnetycznym [H2, H5, H6, H10]. Habilitant opracował technologię wytwarzania amorficznych, drutopodobnych nanołańcuchów żelazo-nikiel i żelazo-kobalt za pomocą innowacyjnej metody reakcji redukcji w zewnętrznym polu magnetycznym [H2, H5, H6]. Ponadto, opracował technologię wytwarzania folii z PVDF-HFP wypełnionych nanocząstkami żelaza i udowodnił ich zastosowanie jako materiału ekranującego bliską podczerwień i średnią podczerwień [H9]. Wykorzystał wielościenne nanorurki węglowe pokryte nanocząstkami Fe_3O_4 jako materiał anodowy dla superkondensatorów z wodnym roztworem 1 M chlorku potasu jako elektrolitu. Zastosowany elektrolit jest bezpieczniejszy niż elektrolity alkaliczne bądź kwasowe [H4]. Należy podkreślić, że **wszystkie artykuły naukowe należące do cyklu są powiązane tematycznie** i zostały opublikowane w uznanych czasopismach naukowych takich jak: *Electrochimica Acta* (Q1, IF= 5,116), *Nanoscale* (Q1, IF=7,233), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (Q2, IF=2,683), *Journal of Energy Storage* (Q1, IF=3,762), *Materials Chemistry and Physics* (Q2, IF=4,094); *Crystal Growth and Design* (Q1, IF=4,076), *Metallurgical and Materials Transactions A* (Q1, IF=2,726), *Materials* (Q2, IF=3,748), *Macromolecular Rapid Communications* (Q1, 4,600), *Langmuir* (Q1, IF=3,900).

Ocena całościowej aktywności naukowej

Na całościowy dorobek naukowy Habilitanta składają się prace opublikowane zarówno przed, jak i po uzyskaniu stopnia doktora. Tych pierwszych jest 6, tych drugich jest prawie sześciokrotnie więcej – 34. Z tego porównania wynika, że dorobek naukowy Habilitanta po doktoracie został w znacznym stopniu powiększony. Wysoki poziom działalności badawczej Habilitanta potwierdzają liczne stypendia i nagrody np. Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców w latach 2020-2023, czy też nagrody Dyrektora Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN za osiągnięcia naukowe przyznawane nieprzerwanie od 2019 r. Habilitant jest także laureatem Polskiej Nagrody Inteligentnego Rozwoju 2021 przyznanej mu w kategorii Naukowiec Przyszłości, jednakże z uwagi na bardzo komercyjny charakter tego konkursu jej wartość w świetle innych nagród jest marginalna.

Dr inż. Marcin Krajewski przed uzyskaniem stopnia doktora brał udział w 6 konferencjach o zasięgu krajowym i międzynarodowym, gdzie zaprezentował wyniki swoich badań tylko w formie posterów. Znacząca poprawa w tym obszarze nastąpiła dopiero po uzyskaniu stopnia doktora. Habilitant zaprezentował wyniki swoich badań tylko w formie referatu na 8 konferencjach o zasięgu krajowym i międzynarodowym, w tym w formie wykładów na zaproszenie w 2019 r. na *2nd International Conference on Material Science and Technology – IMSNC 2019* w Londynie oraz w 2021 i 2023 r. na *International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials: Processing, Fabrication, Properties, Application – THERMEC'2023* w Wiedniu. Z uwagi na wystąpienia Habilitanta tylko na 14 konferencjach w całym okresie pracy naukowej, dorobek w tym obszarze oceniam dostatecznie. Na żadnej z tych konferencji nie otrzymał nagród.

Habilitant kieruje obecnie jednym projektem mobilnościowym pt. „Opracowanie nowych, hybrydowych materiałów elektrolitowych dla elastycznych superkondensatorów wysokonapięciowych” realizowanym pomiędzy Polską Akademią Nauk a Narodową Radą Nauki

i Technologii w Tajwanie, oraz jest wykonawcą w jednym projekcie naukowym pt. „Eksperymentalne i numeryczne badania wpływu mikrostruktury na naprężenia resztkowe oraz właściwości cieplne i mechaniczne w kompozytach gradientowych na osnowie aluminiowej” realizowanym w ramach programu OPUS 18 Narodowego Centrum Nauki. W swoim dorobku Habilitant wykazuje, że kierował projektem naukowym pt. „Nowe, funkcjonalne nanomateriały kompozytowe typu rdzeń-otoczka z rdzeniem żelazo-kobalt oraz żelazo-nikiel: wytwarzanie, właściwości oraz wpływ atmosfery utleniania i temperatury na wzrost otoczki” realizowanego w ramach programu SONATA 12 Narodowego Centrum Nauki. Habilitant był także wykonawcą w projekcie pt. „Wpływ resztkowych naprężeń cieplnych na proces pęknięcia i wybrane właściwości mechaniczne kompozytów metalowo-ceramicznych – badania doświadczalne i modelowanie” realizowanego w ramach programu OPUS 8 Narodowego Centrum Nauki. Za pewien istotny mankament w dorobku naukowym uznają brak kierowania jakimkolwiek projektem badawczo-rozwojowym finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, np. w programie LIDER.

Dr inż. Marcin Krajewski wykazuje się za to dużą aktywnością w zakresie mobilności naukowej. W okresie przed uzyskaniem stopnia doktora zrealizował trzy staże zagraniczne – dwukrotnie po trzy miesiące w Tatung University w Tajwanie oraz jednokrotny pięciomiesięczny staż w Université de Provence we Francji. Po uzyskaniu stopnia doktora aktywność na tym polu zmalała, gdyż Habilitant odbył dwa staże naukowe, jeden dwutygodniowy w Jilin University w Chinach i jeden tygodniowy w Tunghai University w Chinach, jednakże z uwagi na krótki czas pobytu była to bardziej forma wizyty studyjnej.

Habilitant jest ekspertem Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej oceniającym wnioski w programie Ulam w 2021 r. i Bekker w 2022 r. Nie wiadomo jednak, ile wniosków zostało przez niego ocenionych.

Habilitant wykonał 26 recenzji dla następujących czasopism: ACS Applied Electronic Materials (1 szt.), ACS Applied Materials & Interfaces (1 szt.), ACS Applied Nano Materials (1 szt.), Applied Organometallic Chemistry (1 szt.), Applied Physics A (1 szt.), Applied Surface Science (1 szt.), Chemistry of Materials (1 szt.), Electrochimica Acta (5 szt.), Engineering Transactions (1 szt.), Industrial Crops & Products (1 szt.), Journal of Advanced Oxidation Technologies (1 szt.), Journal of Energy Chemistry (1 szt.), Journal of Nanostructure in Chemistry (1 szt.), Journal of the Chemical Society of Pakistan (1 szt.), Materials (3 szt.), Materials Letters (1 szt.), Materials Today Communications (1 szt.), Nanomaterials (1 szt.), Royal Society Open Science (2 szt.).

Dr inż. Marcin Krajewski jest współautorem jednego zgłoszenia patentowego do Urzędu Patentowego RP pt. „Stanowisko do syntezy indukowanej polem magnetycznym” zarejestrowanego w dniu 7 października 2020 r. pod numerem 435602.

Dane naukometryczne Habilitanta są przeciętne, jednakże spełniają wymagania stawiane zwyczajowo kandydatom do stopnia doktora habilitowanego. Według danych podanych przez Kandydata jego indeks Hirscha wg bazy Scopus wynosił 9 (8 bez autocytowań), a jego prace według tej samej bazy były cytowane 344 razy (286 razy bez autocytowań).

DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA, ORGANIZACYJNA I POPULARYZUJĄCA NAUKĘ

Z uwagi na zatrudnienie Habilitanta w instytucie Polskiej Akademii Nauk, w których nie prowadzi się działalności dydaktycznej lub jest ona prowadzona w ograniczonym zakresie, osiągnięcia dr. inż. Marcina Krajewskiego należy uznać za wystarczające do nadania stopnia doktora habilitowanego. Habilitant dzięki współpracy z kilkoma instytucjami naukowymi miał okazję wygłosić

wykłady kierowane głównie do studentów studiów magisterskich, doktoranckich oraz pracowników na wczesnym etapie kariery na University College London, Jilin University oraz Uniwersytecie Warszawskim. Podczas studiów doktoranckich Habilitant prowadził zajęcia dydaktyczne ze studentami Wydziału Fizyki oraz Wydziału Dziennikarstwa i Nauk Politycznych Uniwersytetu Warszawskiego.

Habilitant za publikację pt. „Co potrafi zdziałać pole magnetyczne podczas syntezy chemicznej nanomateriałów?” otrzymał wyróżnienie w konkursie na najlepszy artykuł popularnonaukowy organizowany przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. Dr inż. Marcin Krajewski udzielił także wywiadu popularnonaukowego dla portalu internetowego „Rzecz o Innowacjach” w którym opowiadał o wynikach badań uzyskanych podczas realizacji kierowanego przez siebie projektu „Nowe, funkcjonalne nanomateriały kompozytowe typu rdzeń-otoczka z rdzeniem żelazo-kobalt oraz żelazo-nikiel: wytwarzanie, właściwości oraz wpływ atmosfery utleniania i temperatury na wzrost otoczki”.

WNIOSEK KOŃCOWY

Na podstawie oceny dorobku naukowego Pana dr. inż. Marcina Krajewskiego oraz osiągnięcia naukowego uzyskanego po uzyskaniu stopnia doktora obejmującego cykl 10 artykułów naukowych zatytułowanego „Wytwarzanie, charakteryzacja oraz zastosowanie nanomateriałów zawierających żelazo”, stwierdzam, że jest On doświadczonym i samodzielnym badaczem, który chętnie podejmuje nowe wyzwania.

Dotychczasowe osiągnięcia naukowe Pana dr. inż. Marcina Krajewskiego w pełni spełniają wymagania stawiane Kandydatom ubiegającym się o nadanie stopnia doktora habilitowanego. Habilitant bez wątplenia posiada kwalifikacje do prowadzenia samodzielnej pracy naukowo-badawczej.

Przedstawiony przez Kandydata dorobek naukowy stanowi materiał upoważniający mnie, zgodnie z art. 219 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.), do **jednoznacznego poparcia nadania dr. inż. Marcinowi Krajewskiemu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.**

Dariusz Gąbiec

