

Lublin, 5 lutego 2025 r.

**Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr. Pawła Pęczkowskiego pt. „Analiza wpływu czynników fizykochemicznych na właściwości nadprzewodników tlenkowych” oraz ocena jego dorobku naukowo-dydaktycznego**

Dr Paweł Pęczkowski jest absolwentem Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie ukończył studia magisterskie na kierunku *fizyka* w 2003 roku. Pracę magisterską pt. „*Modelowanie procesów fizycznych w nauczaniu*” przygotował pod kierunkiem dr Stefanii Elbanowskiej-Ciemuchowskiej, uzyskując wyróżnienie Rady Wydziału Fizyki UW. Pracę doktorską pt. „*Trudności w uczeniu się i nauczaniu fizyki kwantowej*” obronił w marcu 2010 roku. Promotorem rozprawy był prof. dr hab. Andrzej Majhofer.

Po uzyskaniu doktoratu Paweł Pęczkowski był zatrudniony (w latach 2011-2015) na etacie młodszego asystenta w Zakładzie Diagnostyki Obrazowej w Instytucie Matki i Dziecka w Warszawie. Z tego okresu pochodzą cztery prace [D1-D4], dotyczące zagadnień medycyny obliczeniowej. Następnie, w okresie 2014-2018, pracował na etacie adiunkta w Zakładzie Technologii Ceramiki w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie. Od tego czasu działalność badawcza Habilitanta skierowała się na zagadnienia doświadczalnej fizyki ciała stałego. Przez kolejny rok dr P. Pęczkowski pracował na etacie naukowo-badawczym w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, zaś od 2019 roku do chwili obecnej jest zatrudniony na etacie adiunkta w Instytucie Nauk Fizycznych na Uniwersytecie Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie.

W dotychczas prowadzonych badaniach z obszaru fizyki materii skondensowanej dr Pęczkowski zajmował się syntezą i badaniem właściwości różnych nadprzewodników (zarówno wysokotemperaturowych jak też fononowych), analizą struktur hybrydowych nadprzewodników a także badaniem magnetycznych właściwości stopów Co-Fe i spinelu ferrytowo-kobaltowego. Na przedłożoną rozprawę habilitacyjną składa się cykl ośmiu artykułów opublikowanych w okresie 2018-2024, których wspólnym wątkiem jest analiza domieszkowania, naświetlania i wpływu kontaktu z materiałami multiferroicznymi oraz modyfikacji strukturalnych (typu porowatego lub ażurowego) na stabilność i mierzalne charakterystyki stanu nadprzewodzącego. W dalszej części przedstawię przegląd ważniejszych osiągnięć i merytoryczną ocenę wyników uzyskanych przez Habilitanta.

[P1] P. Pęczkowski et al, J. Supercond. Nov. Magn. **31**, 2719 (2018).

Celem pracy była synteza (metodą reakcji w stanie stałym) próbek nadprzewodnika wysokotemperaturowego  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  oraz zbadanie ich właściwości strukturalnych i elektronowych w zależności od ciśnienia prasy hydraulicznej użytej w procesie fabrykacji. Na etapie syntezy pastylki były formowane pod wpływem ciśnienia 200, 400, 600 oraz 800 MPa. Różne wartości ciśnienia prowadziły do zagęszczenia próbek ceramicznych, redukując ich porowatość. Ten efekt nie miał jednak istotnego odzwierciedlenia w charakterystykach stanu nadprzewodzącego, które obserwowano w temperaturowej zależności prądu krytycznego oraz oporu. Pewne modyfikacje stwierdzono jedynie w obszarze przejścia fazowego, gdzie próbki otrzymane pod wysokim ciśnieniem wykazały znacznie większą odporność na destrukcyjny wpływ zewnętrznego pola magnetycznego.

[P2] P. Pęczkowski et al, Ceramics International **45**, 18189 (2019).

Przedmiotem pracy było określenie fizyko-chemicznych właściwości kompozytu utworzonego z nadprzewodnika  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  w kontakcie z materiałami multiferroicznymi. Próbki nadprzewodnika otrzymano metodą dwuetapowej kalcynacji, uzyskując wysoką jednorodność struktury ziarnistej. Przeprowadzono następnie analizę właściwości nadprzewodnika domieszkowanego multiferroikiem  $\text{YMnO}_3$  o różnym stopniu zawartości (w zakresie od 0,1 do 5 procent). Autorzy przedstawili charakterystykę strukturalnych i termicznych właściwości, przedyskutowali wyniki pomiarów spektroskopii ramanowskiej i zespolonej podatności magnetycznej oraz oporu elektrycznego. Z mojego punktu widzenia, ciekawe wnioski można wyciągnąć z temperaturowej zależności oporu elektrycznego w pobliżu temperatury krytycznej. Dla niewielkiej zawartości ferroika (do 1 procent) praktycznie nie stwierdzono wpływu ani na zmianę temperatury przejścia ani na szerokość przejścia. Wpływ był natomiast obserwowalny dla próbek z 5-procentową zawartością ferroika, gdzie  $T_c$  uległa zredukowaniu o kilka stopni z jednoczesnym poszerzeniem przejścia fazowego. Trochę szkoda, że nie poświęcono temu efektowi dyskusji.

[P3] P. Pęczkowski et al, J. Eur. Ceramic Soc. **41**, 7085 (2021).

W pracy zbadano wpływ domieszkowania atomami żelaza na właściwości nadprzewodnika wysokotemperaturowego Y-Ba-Cu-O. Kompleksowe badania przeprowadzono przy pomocy pomiarów spektroskopią rentgenowską i absorpcyjną, z użyciem mikroskopii skaningowej, spektroskopii Mössbauera a także Ramana oraz pomiarów podatności magnetycznej i oporu elektrycznego. Wykazano, że przy niewielkiej zawartości atomów żelaza (do 3 procent) wbudowują się one w strukturę nadprzewodnika, nie wpływając znacząco na jego właściwości. Przy większym stopniu domieszkowania atomami Fe dochodzi do formowania się związku  $\text{BaFeO}_{3-\delta}$  i jedynie część pozostałych atomów żelaza wbudowuje się w strukturę nadprzewodnika. Stopniowy wzrost zawartości atomów żelaza powoduje obniżenie prądów krytycznych (według liniowej zależności), co odzwierciedla rywalizację uporządkowania magnetycznego z parowaniem elektronowym. Analogiczny efekt zaobserwowano w temperaturowej zależności oporu stałoprądowego (rysunek 15), przez obniżenie temperatury krytycznej i poszerzenie przejścia ze stanu normalnego w nadprzewodzący.

[P4] P. Pęczkowski et al, Materials **14**, 3503 (2021).

Przeprowadzono analizę degradacji nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego w związku  $(\text{Eu}_x\text{Pr}_{1-x})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  pod wpływem podstawiania atomów Pr w miejsce Eu. Właściwości materiału zbadano w szerokim zakresie domieszkowania  $0 \leq x \leq 1$ . Silnie destrukcyjny wpływ domieszkowania prazeodymem widoczny był już dla koncentracji  $x = 0,2$  powodując redukcję temperatury krytycznej o połowę, stłumienie efektu Meissnera oraz spadek gęstości prądu krytycznego niemal o trzy rzędy wielkości (rysunek 12). Autorzy przeprowadzili szczegółowe badania morfologii związku dla różnych składów  $x$ , wyznaczyli zmianę stałych sieciowych w funkcji zawartości Pr, zbadali temperaturową zależność objętości komórki elementarnej oraz przeprowadzili analizę widm ramanowskich stwierdzając rozszczepienie modu fononowego  $500 \text{ cm}^{-1}$  na dwie gałęzie  $485 \text{ cm}^{-1}$  oraz  $530 \text{ cm}^{-1}$ . Zanik nadprzewodnictwa w związku o zawartości Pr powyżej  $x = 0,4$  przypisano ubytkowi koncentracji dziur oraz redukcji ich mobilności w płaszczyznach  $\text{CuO}_2$ .

[P5] P. Pęczkowski et al, Acta Materialia **222**, 117437 (2022).

W pracy zbadano właściwości grupy nadprzewodników nieskotemperaturowych na bazie tlenku bizmutu baru i potasu domieszkowanego atomami ziem rzadkich: Y, La, Pr. Optymalną wartość temperatury krytycznej ( $T_c \approx 32 \text{ K}$ ) w tej grupie materiałów wykazuje  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$  przy domieszkowaniu potasem  $x \approx 0,4$ . Autorzy wykazali, że domieszkowanie atomami ziem rzadkich obniża temperaturę krytyczną. Dla poszczególnych typów domieszkowania przeprowadzono analizę struktury krystalicznej, dokonano pomiarów magnetyzacji, ciepła właściwego i widma absorpcyjnego w obszarze podczerwieni. Dodatkowo przedstawiono wyniki obliczeń widma elektronowego uzyskane przy pomocy pakietu Quan-

tum Espresso. Z ciekawszych spostrzeżeń warto wymienić obserwację ujemnego efektu magnetokalorycznego w próbkach domieszkowanych prazeodymem.

[P6] P. Pęczkowski et al, Appl. Surface Sci. **636**, 157780 (2023).

W pracy dokonano analizy wpływu naświetlania jonami  $\text{Ne}^+$  na właściwości (dostępnych komercyjnie) cienkich taśm nadprzewodników wysokotemperaturowych tzw. drugiej generacji na bazie gadolinu. Motywacją badań były zarówno aspekty praktyczne (wykorzystanie taśm w przemyśle kosmicznym) jak też zagadnienia z obszaru nauk podstawowych (analiza mechanizmu generowania defektów w strukturze nadprzewodnika). Implementacja jonów  $\text{Ne}^+$  do taśm spowodowała wytworzenie defektów strukturalnych typu Schotky'ego i Frenkla, przekładając się na znaczącą redukcję gęstości prądu krytycznego. Autorzy wysnuli wywniosek, że uszkodzenia radiacyjne osłabiły przepływ prądów zarówno między ziarnami nadprzewodzącymi jak też wewnątrz takich ziaren. Dodatkowym czynnikiem niekorzystnym dla fazy nadprzewodzącej było powstawanie wakansji tlenowych, wpływając na stechiometrię badanego nadprzewodnika  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . Wzrost dawki implementowanych jonów obniżał wyjściową temperaturę krytyczną  $T_c^{(0)} \approx 93$  K do około  $T_c \approx 91$  K.

[P7] P. Pęczkowski et al, J. Eur. Ceramic Soc. **44**, 5722 (2024).

Praca przedstawia wyniki oryginalnych badań, dotyczących realizacji nadprzewodnictwa w porowatych strukturach wytworzonych na bazie pianki poliuretanowej o różnych parametrach elastyczności, twardości oraz gęstości. Do wytworzenia próbek zastosowano nadprzewodniki wysokotemperaturowe z rodziny  $\text{YBaCuO}$ . Analiza mikrotomografii próbek wykazała dość jednorodną architekturę pianek, bez pęknięć lub nieciągłości. Autorzy zbadali morfologiczną współzależność kształtu z rozmiarami porów i przeprowadzili kompleksowe badania reprezentatywnych próbek pod kątem właściwości charakterystycznych dla stanu nadprzewodzącego. Zaobserwowano, że struktura z nieregularnymi porami (odpowiadająca sztywniejszym i bardziej zagęszczonym piankom) jest bardziej korzystną dla fazy nadprzewodzącej niż szkielety giętkie i elastyczne. Nie stwierdzono znaczącego wpływu porowatości na temperaturę przejścia z fazy normalnej do nadprzewodzącej (rysunek 8). Piankowa struktura wpływała natomiast na właściwości magnetyczne i gęstość prądu krytycznego. Zaobserwowano także resztkowy opór w zakresie poniżej temperatury  $T_c$  spowodowany osłabieniem koherencji pomiędzy ziarnami nadprzewodzącymi.

[P8] P. Pęczkowski et al, J. Eur. Ceramic Soc. **44**, 6477 (2024).

Artykuł przedstawia właściwości porowatych struktur nadprzewodzących wytworzonych technologią druku 3D. W przypadku ceramiki  $\text{YBaCuO}$  ten nowatorski sposób fabrykacji próbek jest obciążony ryzykiem pęknięcia spowodowanego naprężeniami powstałymi w

procesie obróbki termicznej. Aby uniknąć tego niepożądanego zjawiska do składników ( $Y_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $BaCO_3$ ) dodawano odpowiednie plastyfikatory oraz surfakanty. Uzyskane pseudoporowate struktury ażurowe poddano następnie badaniom strukturalnym, pomiarom podatności magnetycznej i przewodnictwa termicznego oraz analizie spektroskopii ramanowskiej. Sporym wyzwaniem było zamodelowanie wnikania pola magnetycznego do badanych próbek, z uwzględnieniem pustek w ażurowej strukturze. Metodą elementów skończonych uzyskano również wiarygodne odtworzenie przewodnictwa cieplnego.

Warto podkreślić, że Habilitant jest pierwszym autorem publikacji stanowiących treść przedłożonej rozprawy, co świadczy o Jego wiodącym wkładzie w ich powstanie. Dr Pęczkowski przeprowadził analizę właściwości wybranych nadprzewodników, które znane są od ponad trzydziestu lat. Nie mniej jednak, przeprowadzone badania posiadają istotny element nowatorskości. Za szczególnie wartościowe uznałbym badanie wpływu implantacji lekkich jonów na stabilność nadprzewodnictwa w ultracienkich taśmach  $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (co może mieć przełożenie na zastosowanie w przemyśle kosmicznym), analizę nadprzewodzących struktur porowatych wytworzonych na bazie pianki poliuretanowej a także badania nadprzewodników wytwarzanych technologią druku 3D. Na badania nadprzewodników porowatych dr Paweł Pęczkowski uzyskał grant Miniatura ze środków Narodowego Centrum Nauki. Ten kierunek badań w połączeniu z dynamicznym rozwojem metod druku 3D stwarza fantastyczne możliwości inżynierii nadprzewodników o zadanej strukturze a także pokrewnych heterostruktur, takich jak złącza Josephsona, kwantowe interferometry itp.

Na rozwój naukowy dr. P. Pęczkowskiego korzystnie wpłynęły staże zagraniczne w Wiedniu (Austria), Zagrzebiu (Chorwacja), Novi Sad-zie (Serbia), Lizbonie (Portugalia). Habilitant nawiązał współpracę z wieloma ośrodkami naukowymi w Polsce i partnerami zagranicznymi, co znacząco wzbogaciło Jego warsztat badawczy. Dowodem autentycznej współpracy jest współautorstwo Habilitanta w licznych referatach konferencyjnych. Dr Pęczkowski wygłosił kilka referatów na zaproszenie i przedstawił około 20 posterów konferencyjnych. Podczas Krajowej Konferencji Nadprzewodnictwa zorganizowanej we wrześniu 2024 roku na Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie poster doktora Pęczkowskiego dotyczący *piankowych nadprzewodników* został wyróżniony Pierwszą Nagrodą. Habilitant jest aktywny w działalności recenzenckiej i bierze udział w krajowych towarzystwach naukowych. Ponadto, posiada bezdyskusyjne osiągnięcia w działalności dydaktycznej odzwierciedlone publikacjami na ten temat.

Podsumowując, dr P. Pęczkowski posiada znaczący dorobek z obszaru badań zjawiska nadprzewodnictwa, a zwłaszcza jego form realizowanych w egzotycznych strukturach typu piankowego oraz ażurowego. Są to wartościowe wyniki, które mogą wpłynąć na rozwój dyscypliny i przyczynić się do zastosowań praktycznych oraz umożliwić szersze wykorzystanie nowych technologii (np. druku 3D) w badaniach nadprzewodnictwa. Uważam, że Kandydat spełnia wymagania określone w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawa o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742). Przedkładam więc wniosek do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o dopuszczenie doktora Pawła Pęczkowskiego do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania mu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne.

Jadusi Domaniski