AUTOREFERAT

Dr inż. Daniel Gajda

Załączniki 2

Spis treści

Spis treści 2
1. Dane osobowe.....3
2. Wykształcenie i stopnie naukowe.....3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....3
4. Osiągnięcie będące podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.....4
   4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego.....4
   4.2. Lista publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe.....4
   4.3. Omówienie celu naukowego prac i uzyskanych wyników.....6
      4.3.1. Wstęp - motywacja.....6
      4.3.2. Cel naukowy oraz uzasadnienie wybranych artykułów stanowiących osiągnięcie naukowe.....11
      4.3.3 Podsumowanie osiągniecia naukowego.....35
      4.3.4. Pozostałe osiągnięcia niewchodzące w skład cyklu publikacji naukowych.....38
      4.3.5. Omówienie innych osiągnięć naukowych niezwiązane z tematem osiągnięcia Naukowego.....39
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.....43
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.....45
7. Informacje dodatkowe.....50
8. Bibliografia.....51

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko

Daniel Jan Gajda

Miejsce pracy

Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych

im. Włodzimierza Trzebiatowskiego Polskiej Akademii Nauk

Oddziała Niskich Temperatur i Nadprzewodnictwa

ul. Okólna 2

50-422 Wrocław

E-mail:

d.gajda@intibs.pl, dangajda@op.pl

2. Wykształcenie i stopnie naukowe

a) **11.06.2014 – Doktorat nauk technicznych**, w dyscyplinie : elektrotechnika

Politechnika Lubelska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Tytuł rozprawy doktorskiej

„*Wpływ defektów strukturalnych na gęstość prądu krytycznego przewodów nadprzewodnikowych NbTi i MgB_2*"

promotor: dr hab. inż. Paweł Surdacki

promotor pomocniczy : dr Andrzej Morawski

b) **06.2005 – Magister inżynier, kierunek : elektrotechnika**

Politechnika Częstochowska

Wydział Elektryczny

Tytuł pracy magisterskiej

„Zastosowanie nadprzewodnictwa i krioelrktrotechniki w urządzeniach pracujących w kraju"
promotor : Dr hab. Jacek Sosnowski (Instytut Elektrotechniki w Warszawie)

c) **2005** - habilitant ukończył międzywydziałowe studium kształcenia i doskonalenia nauczycieli na Politechnice Częstochowskiej.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

01.08.2005- 2006	**pracownik techniczny** w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu

2006 - 2014	**asystent** w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu
2014 -2017	**adiunkt** w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu
2017 - obecnie	**adiunkt** w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych i Niskich Temperatur Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu

4. Osiągnięcie będące podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

Jako osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2. Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, przedstawiam cykl tematycznie powiązanych artykułów naukowych [**Q1 – Q9**] z lat 2016 – 2025.

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Mechanizmy kotwiczenia sieci wirów na centrach kotwiczenia oraz ich wpływ na gęstość prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych w stanie mieszanym

4.2. Lista publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe:

Wykaz publikacji naukowych : autorzy (* - autor korespondencyjny), tytuł artykułu, czasopismo, wydania, rok

[Q1] D. Gajda*, A. Zaleski, A. Morawski, M. S.A. Hossain, *„New types of high field pinning centers and pinning centers for the peak effect"*, **Superconductor Science and Technology** 30 (2017) 085011, $IF_{2017} = 2.861$

Wkład habilitanta w publikacje naukową *: opracowanie koncepcji artykułu, opracowanie metodyki badawczej, opracowanie próbki z odizolowanymi centrami kotwiczenia, wykonanie pomiarów prądu krytycznego (I_c) w 4.2 K, wyznaczenie nieodwracalnego pola magnetycznego (B_{irr}), wykonanie obliczeń gęstości prądu krytycznego i dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów, interpretacja wyników pomiarowych, przygotowanie publikacji oraz dyskusja z recenzentami.*

[Q2] D. Gajda*, A. Zaleski, *„The influence of the direction of dislocation to the external magnetic field on the critical current density and strong trapping of the vortex lattice in NbTi wires"* **Journal of Superconductivity and Novel Magnetism** 38 (2025) 31, $IF_{2024} = 1.7$

Wkład habilitanta w publikacje naukową *: opracowanie koncepcji artykułu, opracowanie metodyki badawczej, przygotowanie próbki z odizolowanymi centrami kotwiczenia, wykonanie pomiarów prądu krytycznego (I_c), wykonanie obliczeń gęstości prądu krytycznego i analiza mechanizmu kotwiczenia sieci wirów, interpretacje wyników pomiarowych, przygotowanie publikacji oraz dyskusja z recenzentami.*

[Q3] D. Gajda*, A. Morawski, A.J. Zaleski, T. Cetner, W. Häßler, K. Nenkov, M. Małecka, M.A. Rindfleisch, and M. Tomsic, *„Significant enhancement of the critical current of MgB_2 wires through a reduction of the diameter using HIP method"*, **Scripta Materialia** 143 (2018) 77-80, $IF_{2018} = 4.539$

Wkład habilitanta w publikacje naukową *: opracowanie koncepcji artykułu, opracowanie metodyki badawczej, wykonanie pomiarów prądu krytycznego (I_c) w 20 K, wyznaczenie parametrów krytycznych*

temperatura krytyczna (T_c), górne pole krytyczne *(B_{c2}) i nieodwracalna pole magnetyczne (B_{irr}), wykonanie obliczeń gęstości prądu krytycznego i siły kotwiczenia w 20 K oraz wyznaczenie dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów 20 K, interpretacja wyników pomiarowych, przygotowanie publikacji oraz dyskusja z recenzentami.*

[Q4] D. Gajda*, A. Morawski, A.J. Zaleski, W. Häßler, K. Nenkov, M. Małecka, M. A. Rindfleisch, M.S.A. Hossain, M. Tomsic, *„Experimental research of high field pinning centers in 2% C doped MgB_2 wires at 20 K and 25 K"*, **Journal of Applied Physics** 120 (2016) 113901, $IF_{2016} = 2.068$

***Wkład habilitanta w publikacje naukową** : opracowanie koncepcji artykułu, opracowanie metodyki badawczej, wykonanie pomiarów I_c w 10 K, 20 K i 25 K, wyznaczenie parametrów krytycznych : T_c, B_{c2} i B_{irr}, wykonanie obliczeń gęstości prądu krytycznego (J_c) w 10 K, 20 K i 25 K i dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów 20 K, interpretacja wyników pomiarowych, przygotowanie publikacji oraz dyskusja z recenzentami.*

[Q5] D. Gajda*, M. Babij, A. Zaleski, D. Avci, F. Karaboga, H. Yetis, I. Belenli, D. Zasada, D. Szymański, M. Małecka, W. Gil, T. Czujko, *„The influence of Sm_2O_3 dopant on structure, morphology and transport critical current density of MgB_2 wires investigated by using the transmission electron microscope"* **Journal of Magnesium and Alloys** 12 (2024) 5061-5078, $IF_{2024} = 15.8$

***Wkład habilitanta w publikacje naukową** : opracowanie koncepcji artykułu, opracowanie metodyki badawczej, wykonanie próbek do badań za pomocą proszkowej dyfrakcji rentgenowskiej, wykonanie pomiarów I_c w 15K, 20 K, 25 K i 30 K, wyznaczenie parametrów krytycznych T_c i B_{irr}, wykonanie obliczeń gęstości prądu krytycznego w 15 K, 20 K, 25 K i 30 K, analiza dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów w 20 K i 30 K, interpretacje wyników pomiarowych, przygotowanie publikacji oraz dyskusja z recenzentami.*

[Q6] D. Gajda*„*Analysis method of high-field pinning centers in NbTi wires and MgB_2 wires"*, **Journal of Low Temperature Physics** 194 (2019) 166-182, $IF_{2019} = 1.090$

***Wkład habilitanta w publikacje naukową** : opracowanie koncepcji artykułu, opracowanie metodyki badawczej, wykonanie pomiarów I_c, wykonanie obliczeń gęstości prądu krytycznego, oraz analiza mechanizmu kotwiczenia sieci wirów za pomocą metody opracowanej przez habilitanta, interpretacja wyników pomiarowych, przygotowanie publikacji oraz dyskusja z recenzentami.*

[Q7] D. Gajda*, A. Zaleski, A. Morawski, T. Cetner, C.J. Thong, M.A. Rindfleisch, *„Point pinning centers in SiC doped MgB_2 wires after HIP"*, **Superconductor Science and Technology** 29 (2016) 85010, $IF_{2016} = 2.878$

***Wkład habilitanta w publikacje naukową** : opracowanie koncepcji artykułu, opracowanie metodyki badawczej, wykonanie pomiarów I_c w 4.2 K, wyznaczenie B_{irr}, wykonanie obliczeń gęstości prądu krytycznego i dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów, analiza morfologii i składu materiału MgB_2, interpretacja wyników pomiarowych, przygotowanie publikacji oraz dyskusja z recenzentami.*

[Q8] D. Gajda*, A.J. Zaleski, A.J. Morawski, M. Babij, D. Szymański, G. Gajda, M.A. Rindfleisch, M. Shahbazi, M.S.A. Hossain, *„Superior engineering critical current density obtained via hot isostatic pressing of MgB_2 wires manufactured using nano-amorphous isotopic boron"*, **Journal of Alloys and Compounds** 871 (2021) 159579, $IF_{2021} = 6.371$

***Wkład habilitanta w publikacje naukową** : opracowanie koncepcji artykułu, opracowanie metodyki badawczej, wykonanie pomiarów I_c w 4.2 K, wyznaczenie parametrów krytycznych B_{c2} i B_{irr}, wykonanie obliczeń gęstości inżynierskiego prądu krytycznego w 4.2 K oraz analiza mechanizmu kotwiczenia sieci*

wirów w 4.2 K za pomocą metody opracowanej przez habilitanta, interpretacja wyników, przygotowanie publikacji oraz dyskusja z recenzentami.

[Q9] D. Gajda*, A.J. Zaleski, M. Babij, D. Szymański, A.J. Morawski, M.A. Rindfleisch, D. Patel, M.S.A. Hossain, *„Influence of bending and heat treatment under high isostatic pressure on synthesis reaction and transport critical current density in isotopic IMD $Mg^{11}B_2$ wind and react coils"* **Journal of Alloys and Compounds** 963 (2023) 171239, $IF_{2023} = 5.8$

***Wkład habilitanta w publikacje naukową** : opracowanie koncepcji artykułu, opracowanie metodyki badawczej, wykonanie do badań małych cewek $Mg^{11}B_2$, wykonanie pomiarów I_c w 20 K i 25 K, wyznaczenie parametrów krytycznych T_c i B_{irr}, wykonanie obliczeń gęstości prądu krytycznego w 20 K i 25 K, i analiza centrów kotwiczenia sieci wirów w 20 K, interpretacja wyników pomiarowych, przygotowanie publikacji oraz dyskusja z recenzentami.*

4.3. Omówienie celu naukowego prac i uzyskanych wyników w ramach cyklu publikacji zatytułowanych *„Mechanizmy kotwiczenia sieci wirów na centrach kotwiczenia oraz ich wpływ na gęstość prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych w stanie mieszanym"*

4.3.1. Wstęp i motywacja

Przewody nadprzewodnikowe znajdują szerokie zastosowanie w medycynie, przemyśle, energetyce, górnictwie, technikach kosmicznych oraz w zastosowaniach militarnych. Obecnie istnieje potrzeba opracowania tanich i łatwych w produkcji przewodów nadprzewodnikowych o wysokiej gęstości prądu krytycznego w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji. Takie rozwiązania mogłyby znacząco obniżyć koszty produkcji cewek nadprzewodnikowych. Tanie cewki nadprzewodnikowe przyczyniłyby się do redukcji kosztów wytwarzania urządzeń do rezonansu magnetycznego (MRI), co zwiększyłoby dostępność badań MRI dla pacjentów i mogłoby poprawić stan zdrowia społeczeństwa w Polsce. Dodatkowo przystępne cenowo cewki nadprzewodnikowe umożliwiłyby rozwój systemów gromadzenia energii w polu magnetycznym, co jest istotne w kontekście nadprodukcji energii z odnawialnych źródeł. Niemniej jednak największym wyzwaniem dla nadprzewodnictwa pozostaje opracowanie przewodów, które mogłyby być wykorzystane do budowy cewek nadprzewodnikowych dla reaktorów termojądrowych. Reaktory te stanowią jedyne źródło energii, które może dostarczać tanią i czystą energię, kluczową dla dalszego rozwoju ludzkości. Niestety, niska gęstość prądu krytycznego, zwłaszcza w ceramicznych materiałach nadprzewodnikowych, znacznie ogranicza ich zastosowanie. Kluczowym czynnikiem, który mógłby zwiększyć krytyczną gęstość prądu, jest zrozumienie i udoskonalenie mechanizmów kotwiczenia sieci wirów na centrach kotwiczenia w stanie mieszanym. Wysoka gęstość prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych mogłaby przyczynić się do rozwiązania najważniejszych problemów ludzkości związanych z energetyką.

Istnienie sieci wirów w stanie mieszanym w materiałach nadprzewodnikowych zostało po raz pierwszy zaproponowane przez Abrikosowa [1,2] w 1957 roku. Przez wiele lat teoria ta nie była szeroko akceptowana i często była kwestionowana. Jej słuszność została jednak potwierdzona w 1967 roku przez Essmanna i współpracowników [3]. Późniejsze badania wykazały, że teoria Abrikosowa stanowiła przełom, umożliwiając wyjaśnienie szeregu zjawisk fizycznych zachodzących w nadprzewodnikach w stanie mieszanym. Wykonane badania wykazały, że w nadprzewodnikach drugiego rodzaju energia powierzchniowa na granicy pomiędzy obszarami nadprzewodnikowymi a normalnymi przyjmuje wartość ujemną. W konsekwencji tworzenie obszarów normalnych pozwala na obniżenie energii swobodnej nadprzewodnika. Stan normalny jest tworzony przez cylindryczne obszary, ustawione równolegle do zewnętrznego pola magnetycznego, które tworzą rdzenie wirów. Każdy wir może mieć maksymalne pole magnetyczne o wartości dwukrotnie większej od dolnego pola krytycznego ($2B_{c1}$) oraz średnicę równą podwójnej długości koherencji (2ξ) [4]. Na zewnątrz rdzenia wiru płyną prądy

nadprzewodzące, które generują kwant strumienia magnetycznego. Przeprowadzone badania wykazały, że wir o średnicy 2ξ, znajdujący się w stanie normalnym, zwiększa energię układu [4]. Dalsze analizy wskazały jednak, że energia ta może zostać obniżona, gdy rdzeń wiru połączy się z obszarem normalnym, tzw. centrum kotwiczenia. Na tej podstawie można stwierdzić, że z punktu widzenia energetycznego korzystniejsze jest umieszczenie wiru w już istniejącym obszarze normalnym niż tworzenie nowego obszaru normalnego w materiale nadprzewodnikowym. Dalsze teoretyczne obliczenia Priour i współpracowników [5] pozwoliły opisać zachowanie wiru w trakcie zbliżania się do centrum zakotwiczenia. Wyniki wskazały, że rdzeń wiru rozciąga się aż do granicy defektu, a nadprzewodzący prąd wraz ze strumieniem magnetycznym wypełnia centrum zakotwiczenia. Proces ten przebiega dynamicznie, a wir jest szybko przyciągany do centrum zakotwiczenia [5]. Ge i współpracownicy [6] wykazali, że zmiana temperatury powoduje modyfikację długości koherencji (ξ) oraz głębokości penetracji (λ), co wpływa na interakcję między wirami a pobliskimi centrami zakotwiczenia. Obserwacje przy użyciu mikroskopii skaningowej z sondą Halla (SHPM) wykazały, że wzrost temperatury prowadzi do wydłużenia kształtu wiru oraz rozszerzenia jego strumienia magnetycznego na sąsiednie centra zakotwiczenia. Zwiększenie temperatury umożliwia także prądowi wiru płynąć w większym obszarze, co wynika ze wzrostu λ [6]. Badania pokazały również, że dwa wiry mogą zakotwiczyć się w tym samym centrum pomimo odpychających oddziaływań i obecności innych centrów zakotwiczenia. Ge i współpracownicy [6] sugerują, że efekt ten może być obserwowany w wyższych polach magnetycznych. Wyniki badań podkreślają również, że efektywność centrów zakotwiczenia odgrywa kluczową rolę w procesie unieruchamiania wirów w nadprzewodnikach.

W nadprzewodnikach w stanie mieszanym wzrost pola magnetycznego od B_{c1} do B_{c2} prowadzi do zwiększenia liczby wirów (kwantów strumienia) oraz zmniejszenia odległości między nimi. Analizy Abrikosowa wykazały, że kwanty strumienia w materiale nadprzewodnikowym tworzą trójkątną sieć wirów. W niskich polach magnetycznych odległości między poszczególnymi wirami są duże, co powoduje słabe oddziaływanie między wirami przy jednoczesnym silnym oddziaływaniu wirów z centrami kotwiczenia [7]. W wysokich polach i przy podwyższonych temperaturach interakcje między wirami stają się silniejsze, podczas gdy oddziaływanie wirów z centrami zakotwiczenia ulega osłabieniu [7,8]. Obserwacje wykazały również, że gęstość strumienia magnetycznego jest największa przy powierzchni nadprzewodnika i stopniowo maleje w jego wnętrzu [9]. Materiał nadprzewodnikowy przechodzi w stan normalny, gdy odległość między wirami osiąga długość koherencji [7,10]. Sieć wirów może być jednocześnie zakotwiczona przez różne typy centrów kotwiczenia, co znacząco zwiększa efektywność przypinania i ogranicza efekt pełzania, ponieważ sieć może ulegać wygięciom, załamaniom i skręceniom [7,10–13]. Oddziaływanie wirów z defektami strukturalnymi zostało wskazane jako kluczowy czynnik determinujący właściwości nadprzewodników [10]. W związku z tym lepsze zrozumienie mechanizmów przypinania sieci wirów do defektów strukturalnych jest istotne dla dalszego rozwoju i postępu w dziedzinie materiałów nadprzewodnikowych [10].

Dotychczasowe badania wykazały, że ruch sieci wirów w materiałach nadprzewodnikowych w stanie mieszanym jest generowany przez siłę Lorentza, powstającą w wyniku przepływu prądu w materiale nadprzewodnikowym. Kwok i współpracownicy [10] wskazali, że nawet niewielka siła Lorentza może wywoływać ruch sieci wirów w nadprzewodnikach pozbawionych defektów strukturalnych (centrów zakotwiczenia). Materiały tego typu charakteryzują się bardzo niską gęstością prądu krytycznego (J_c). Badania wykazały również, że ruch sieci wirów w nadprzewodnikach w stanie mieszanym można ograniczyć dzięki obecności defektów strukturalnych (centrów zakotwiczenia) [9,14–16]. Koshelev i współpracownicy [17] wykazali, że w nadprzewodnikach w stanie mieszanym może występować dalekozasięgowe oddziaływanie między wirem a defektem strukturalnym, szczególnie gdy wir zbliża się wystarczająco blisko defektu. Embon i współpracownicy [11] wskazali ponadto, że wir może zostać zakotwiczony przez skupiska lub klastry kilku defektów rozmieszczonych na długości koherencji.

Obecnie centra kotwiczenia dzieli się na przyciągające i odpychające [9,18], wewnątrz ziarnowe oraz międzyziarnowe [19], a także na punktowe, jednowymiarowe i dwuwymiarowe [10]. Przyciągające centra kotwiczenia można sklasyfikować jako: powierzchniowe (duże obszary normalne, np. wydzielenia, pustki), punktowe (obszary normalne o wielkości zbliżonej do długości koherencji, np.

wydzielenia, zanieczyszczenia, pustki) oraz liniowe (dyslokacje) [18]. Odpychające centra kotwiczenia mogą tworzyć magnetyczne cząstki [18]. Wewnątrz ziarnowe centra kotwiczenia obejmują dyslokacje, naprężenia, odkształcenia oraz ścieżki powstałe po napromieniowaniu [20]. Międzyziarnowe i punktowe centra kotwiczenia tworzą pustki, wydzielenia i zanieczyszczenia [10,19]. Jednowymiarowe centra kotwiczenia odpowiadają dyslokacjom i ścieżkom po napromieniowaniu [10], natomiast dwuwymiarowe powstają na granicach bliźniaczych [10]. Badania wykazały, że centra kotwiczenia rozmieszczone są w mikrostrukturze materiału nadprzewodnikowego w sposób niejednorodny [8]. Taki niejednorodny rozkład centrów kotwiczenia powoduje istotne zmiany gęstości prądu krytycznego w przewodach, taśmach i masywnych próbkach, co znacząco ogranicza możliwości zastosowania np. przewodów nadprzewodnikowych w konstrukcji cewek [8]. Long [21] wskazuje, że lepsze zrozumienie procesów powstawania centrów kotwiczenia w mikrostrukturze nadprzewodników jest niezbędne do głębszego poznania mechanizmów kształtujących gęstość prądu krytycznego.

Punktowe centra kotwiczenia odgrywają kluczową rolę, ponieważ umożliwiają silne zakotwiczenie sieci wirów w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji [18]. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie wysokiej gęstości prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych w takich polach. Z tego powodu wiele grup badawczych prowadzi intensywne badania nad tymi centrami kotwiczenia [22–24]. Analizy wykazały, że kluczową zasadą unieruchamiania sieci wirów na punktowych centrach zakotwiczenia jest lokalne zakłócenie stanu nadprzewodzącego w obszarach o rozmiarach zbliżonych do długości koherencji (ξ), która w przypadku nadprzewodników wysokotemperaturowych wynosi zazwyczaj 1–5 nm [20,25]. Oznacza to, że skuteczne unieruchamianie sieci wirów wymaga nanodefektów dopasowanych do linii wirowych. Takie nanodefekty w materiałach nadprzewodnikowych można wytworzyć poprzez domieszkowanie, obróbkę termiczną oraz procesy obróbki na zimno [22,24,26–29]. Badania wykazały również, że napromieniowanie ciężkimi jonami pozwala tworzyć punktowe centra zakotwiczenia o rozmiarach od 3 nm do 5 nm [7,30,31]. Dodatkowo, punktowe centra zakotwiczenia umożliwiają silne kotwiczenie sieci wirów w nadprzewodnikach opartych na żelazie [32]. Wykazano również, że krytyczna gęstość prądu wzrasta wraz ze wzrostem liczby centrów kotwiczenia [9].

Wykonane pomiary pokazały, że liniowe centra zakotwiczenia pozwalają silnie zakotwiczyć sieć wirów w materiałach nadprzewodnikowych [18]. Zrealizowane badania pokazały, że zarówno dyslokacje, jak defekty strukturalne tworzone przez napromieniowanie ciężkimi jonami mają potencjał do tworzenia liniowych centrów kotwiczenia [30,33,34]. Kwok i współpracownicy [10], Panek i współpracownicy [35] i Matsuhita i współpracownicy [36] pokazują, że liniowe defekty silnie kotwiczą sieć wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji. Ponadto analizy i badania wykonane przez Kwok i współpracownicy [10] wskazują, że liniowe defekty słabo kotwiczą sieć wirów w zakresie wysokich temperatur. Przeprowadzone badania przez Klaassen [30] pokazały, że równoległe ustawienie wiru względem defektu liniowego prowadzi do silnego zakotwiczenia wiru na całej długości liniowego defektu. Efektywności kotwiczenia wirów na defektach liniowych zależy od dopasowania wielkości rdzenia wiru do rozmiarów defektu liniowego [9,30]. Wykonane badania pokazały, że defekty liniowe mogą tylko zakotwiczyć pojedyncze wiry [17,37]. Blatter i współpracownicy wskazują, że centra zakotwiczenia otrzymane za pomocą napromieniowania pozwalają silnie zakotwiczyć sieć wirów, znacznie zwiększyć gęstość prądu krytycznego, nieodwracalne pole magnetyczne (B_{irr}) oraz górne pole magnetyczne (B_{c2}) [7]. Obecne badania pokazują, że proces hydroekstruzji w materiale nadprzewodnikowym na bazie żelaza ($Ba_{0.6}K_{0.5}Fe_2As_2$) pozwala otrzymać defekty liniowe o średnicy 3 nm z odstępem między nimi 10 nm [20]. Wyniki badań pokazują, że defekty liniowe otrzymane za pomocą procesu hydroekstruzji o długości kilkuset nanometrów umożliwiają efektywniejsze unieruchomienie sieć wirów [20].

Przeprowadzone badania pokazały, że dyslokacje pozwalają silnie zakotwiczyć sieć wirów i znacznie zwiększyć gęstość prądu krytycznego w materiałach nadprzewodnikowych wysokotemperaturowych ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$) [30,38]. Dyslokacje są szczególnie skuteczne ze względu na swoją jednowymiarową geometrię, która umożliwia im rozległą interakcję z liniami wirowymi [20]. Dalsze badania pokazały, że dyslokacje krystaliczne znacznie słabiej kotwiczą sieć wirów niż obszary

normalne o rozmiarach zbliżonych do długości koherencji [9]. Obecne badania i pomiary wskazały, że dyslokacja ustawiona równolegle do zewnętrznego pola magnetycznego i prostopadle do płynącego prądu pozwala najsilniej zwiększają J_c w cienkich warstwach nadprzewodnikowych [39]. Herring sugeruje że ustawienie dyslokacji krystalicznych może mieć wpływ na siłę kotwiczenia sieci wirów w materiałach nadprzewodnikowych [40]. Analizy wykonane przez Matsushita pokazały, że zewnętrzna część dyslokacji jest otoczona odkształceniami, które także mogą wpływać na siłę kotwiczenia sieci wirów [9]. Przeprowadzone badania wskazały, że obróbka termiczna nadprzewodników ceramicznych prowadzi do usuwania dyslokacji [20].

W materiałach nadprzewodnikowych mogą także powstać inne typy centrów kotwiczenia, które pozwalają silnie kotwiczyć sieć wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji, np. odkształcenia, podstawienia do sieci krystalicznej oraz wydzielania wewnątrz ziarnowe. Tego typu centra kotwiczenia są często nazywane punktowymi centrami kotwiczenia. Przeprowadzone pomiary pokazały, że odkształcenia i naprężenia w materiale nadprzewodnikowym mogą tworzyć się podczas procesu schładzania próbek, szczególnie w nadprzewodnikowych materiałach ceramicznych [41,42]. Kazakov i współpracownicy wskazali, że podstawieniowe centra zakotwiczenia w materiale nadprzewodnikowym MgB_2 może tworzyć C, który może podstawić się za B podczas procesu wygrzewania [25,41]. Dalsze badania wskazały, że wewnątrz ziarnowe centra kotwiczenia mogą powstawać w przesyconych (duża ilość Ti) materiałach nadprzewodnikowych np. NbTi podczas procesu schładzania [43].

Obecnie stosuje się wiele metod analizy dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów na defektach strukturalnych w materiałach nadprzewodnikowych np. metoda Kramera [44,45], metoda Dew-Hughesa [46], model Higuchiego i współpracowników [47], model analizujący zmiany drogi swobodnej δl i temperatury krytycznej δT_c [22]. Większość tych modeli opiera się na analizie siły zakotwiczenia oraz skalowania siły zakotwiczenia w zależności od pola magnetycznego i temperatury. Istotnym czynnikiem, który należy wyznaczyć w tych analizach, jest nieodwracalne pole magnetyczne [9, 46] lub pole magnetyczne, w którym siła zakotwiczenia osiąga maksymalną wartość [47]. Metody te pozwalają określić dominujący mechanizm kotwiczenia sieci wirów w materiale nadprzewodnikowym. Wyniki ten pozwala określić, który typ centrów kotwiczenia występuje w materiale nadprzewodnikowym najliczniej. Powyższe metody pozwalają wskazać trzy rodzaje centrów kotwiczenia powierzchniowe, punktowe i liniowe [9,18,46,47]. Przeprowadzone badania przez Ghorbani i współpracowników pokazały, że interakcje miedzy wirami i centrami kotwiczenia można analizować na podstawie analizy drogi swobodnej δl i temperatury krytycznej δT_c [22]. Otrzymane wyniki badań wskazały, że mechanizm zakotwiczenia związany z δl najsilniej kotwiczy sieć wirów w niskich temperaturach [22]. Dalsze pomiary wskazały, że mechanizm kotwiczenia powiązany z δT_c najefektywniej kotwiczy sieć wirów w wysokich temperaturach [22]. Powyższe metody analizy mechanizmów kotwiczenia pozwalają analizować oddziaływanie sieci wirów tylko z jednym rodzajem centrów kotwiczenia, których pojawia się największa ilość w materiale nadprzewodnikowym. Metody te nie pozwalają analizować oddziaływania sieci wirów z pozostałymi centrami kotwiczenia. To znacząco utrudnia tworzenie i kształtowanie centrów kotwiczenia i ulepszanie krytycznej gęstości prądu w przewodach nadprzewodnikowych.

Parametry krytyczne i kotwiczenie sieci wirów w materiale NbTi jest zależne od jego morfologii. Materiał NbTi tworzy dwie fazy stabilne: faza β (NbTi) i faza α (Ti wydzielania między ziarnowe) oraz trzy fazy metastabilne: faza α' (Ti wydzielenia wewnątrz ziaren), fazę α" (Ti wydzielanie między ziarnami) i fazę ω [48]. Materiał NbTi ma strukturę krystaliczną kubiczną centrowaną (BCC) o stałej sieciowej około 0.3285 nm [48]. Wydzielania między ziarnowe α Ti powstają podczas procesu obróbki cieplnej [48]. Stabilna faza α-Ti ma strukturę heksagonalną o zwartym upakowaniu (hexagonal close-packed) [48] i stałe sieci a = 0,2956 nm i c = 0,4716 nm. Faza α-Ti zawiera również niewielką ilość Nb, w zakresie od 1 do 2% [48]. Niska zawartość Nb powoduje, że wydzielania α - Ti mają bardzo niską temperaturę krytyczną, wynoszącą około 0,39 K [49]. Powstawanie wydzieleń α - Ti jest uzależnione od wielu czynników np. od zawartości Ti w materiale NbTi [50], gęstości dyslokacji [29,41], rozmiaru i liczby pustych przestrzeni [51,52], kształtów ziaren NbTi, temperatury wygrzewania

i ilości faz metastabilnych [53]. Przeprowadzone badania pokazały, że proces wygrzewania może tworzyć wydzielania α - Ti o grubość 100–200 nm [29,52,54]. Lee sugeruje, że największa ilość wydzieleń α - Ti (około 10%) powstaje podczas pierwszego procesu wygrzewania materiału NbTi [48]. Wykonane badania pokazały, że proces zimnej obróbki pozwala dopasować grubość wydzieleń α - Ti do długości koherencji i wielkości rdzenia wiru [55,56]. Optymalne wydzielenia fazy α-Ti charakteryzują się grubością 1–5 nm i długością 1–10 μm [56,57]. Przeprowadzone badania pokazały, że siła kotwiczenia sieci wirów oraz gęstości prądu krytycznego dla wydzieleń α - Ti jest zależna od wielu czynników np. kształtu, grubości i położenia [58]. Najwyższą gęstość prądu krytycznego w przewodach NbTi uzyskano dla zawartości wydzieleń α - Ti w zakresie od 25 do 33% (5400 A/mm^2 – 5 T) [45]. Materiał NbTi charakteryzuje się temperaturą krytyczną (T_c) 9.6 K, długością koherencji około 5 nm i nieodwracalnym polem magnetycznym (B_{irr}) około 11.5 T [48,57]. Nadprzewodnictwo w materiale nadprzewodnikowym NbTi zostało odkryte 75 lat temu ale nadal jest to najczęściej stosowany materiał nadprzewodnikowy na świecie. Pomimo wielu lat badań nie udało się wskazać rodzajów centrów kotwiczenia, które kotwiczą sieć wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji. Dotychczasowe badania pozwoliły wskazać że powierzchniowe centra kotwiczenia kotwiczą sieć wirów w polach magnetycznych o niskiej indukcji [18,43]. Dalsze pomiary i analizy wskazały, że wydzielenia α - Ti o grubości zbliżonej do długości koherencji najefektywniej kotwiczą sieć wirów w polach magnetycznych o średniej indukcji (5 T) [58,59]. Wyniki prezentowane przez Panek i współpracowników [35] oraz przez Matsuhita i współpracowników [36] sugerują, że dyslokacje najefektywniej kotwiczą sieć wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji. Jednakże powyższe pomiary, badania i analizy nie wskazały zakresu pól magnetycznych, w których poszczególne centra kotwiczenia najefektywniej kotwiczą sieć wirów. Poznanie zakresu tych pól magnetycznych, w których poszczególne centra kotwiczenia najsilniej przypinają sieć wirów, pozwoli lepiej zrozumieć interakcje sieci wirów z centrami zakotwiczenia, umożliwi lepsze zrozumienie procesu wnikania kwantów strumienia do materiałów nadprzewodnikowych oraz pozwoli znacznie zwiększyć krytyczną gęstość prądu w przewodach NbTi.

Przeprowadzone badania wykazały, że parametry krytyczne oraz kotwiczenie sieci wirów w ceramicznym materiale nadprzewodnikowym MgB_2 jest zależne od morfologii i ilości połączeń międzyziarnowych [60]. Wykonane badania wskazały, że materiał MgB_2 krystalizuje w strukturze heksagonalnej oraz posiada stałe sieciowe a = 3.086 Å and c=3.524 Å [60,61]. Ponadto materiał MgB_2 ma bardzo niską gęstość 2.6 g/cm^3, niską anizotropię 1.5 do 5, wysoką temperaturę krytyczną około 39 K, długość koherencji (ξ) około 5 nm (4.2 K) i 10 nm (20 K), bardzo niską rezystywność 10^{-9} Ω*m, głębokość wnikania od 80 nm do 200 nm, nieodwracalne pole magnetyczne 22 T oraz dolne pole krytyczne (B_{c1}) w zakresie od 27 mT do 48 mT [37,60,62,63,64,65,66]. Przeprowadzone badania pokazały, że otrzymywanie fazy nadprzewodnikowej MgB_2 nie jest łatwe, ponieważ występuje duża różnica między temperaturą topnienia Mg (650 °C) i B (2100 °C) [66]. Liu i współpracownicy [66] pokazali, że zbyt wysoka temperatura wyżarzania i wysoka zawartość boru mogą prowadzić do tworzenia faz MgB_4 i MgB_7. Ponadto pomiary wskazały, że ziarna MgB_4 i MgB_7 o dużych rozmiarach znacząco ograniczają ilość fazy nadprzewodnikowej MgB_2 [60,66]. Dotychczasowe badania pokazały, że ziarna MgB_2 o małych rozmiarach pozwalają otrzymać dużą gęstość centrów kotwiczenia na granicach ziaren [60]. Obecnie badania wskazują, że materiał MgB_2 ma powierzchniowy dominujący mechanizm kotwiczenia sieci wirów [67]. Ten mechanizm kotwiczenia jest tworzony przez puste przestrzenie powstające podczas procesu wygrzewania i tworzenia się fazy nadprzewodnikowej MgB_2. Puste przestrzenie są efektem dyfuzji Mg do warstw B. Badania prowadzone przez Jung i współpracowników [37] wskazały, że puste przestrzenie w materiale MgB_2 mogą stanowić nawet 25% powierzchni materiału nadprzewodnikowego. Dużą wadą pustych przestrzeni jest redukcja ilości połączeń międzyziarnowych. Ponadto powierzchniowe centra kotwiczenia pozwalają silnie przypiąć sieć wirów tylko w polach magnetycznych o niskiej indukcji. To znacznie redukuje gęstość prądu krytycznego w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji. Prowadzone są liczne prace badawcze mające na celu zbadanie oddziaływania między siecią wirów i punktowymi oraz liniowymi centrami kotwiczenia w materiale MgB_2 [68,69,70]. Jednak otrzymywanie punktowych centrów

kotwiczenia w materiale MgB_2 jest bardzo trudne, ponieważ wymaga uzyskania obszarów normalnych zbliżonych do długości koherencji, np 5 nm (4.2 K) [60]. Wykonane pomiary sugerują, że domieszkowanie, np. SiC, tlenkami ziem rzadkich i węglem może pozwalać otrzymać punktowe centra kotwiczenia [69]. Serquis i współpracownicy [68] wskazują, że liniowe centra kotwiczenia (dyslokacje) w materiale MgB_2 mogą być uzyskane podczas procesu wygrzewania pod wysokim ciśnieniem izostatycznym. Dalsze badania pokazały, że proces podstawienia C za B w materiale MgB_2 pozwala uzyskać centra kotwiczenia, które przypinają sieć wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji [25,69]. Proces podstawienia C za B prowadzi do zmniejszenia stałej sieciowej a, ponieważ rozmiar atomu C jest mniejszy niż atomu B. To prowadzi do zwiększenia B_{irr} i J_c. Ponadto podstawienie, C za B wprowadza dodatkowy elektron, który skraca drogę swobodną i zmniejsza punktowo długość koherencji [25]. To prowadzi do zwiększenia B_{c2}. Dotychczasowe badania jednak słabo pozwoliły poznać oddziaływanie sieci wirów z poszczególnymi centrami kotwiczenia w materiale MgB_2. Wynika to z dostępnych analiz dominującego mechanizmu kotwiczenia oraz z trudności w uzyskaniu dużej gęstości punktowych i liniowych centrów kotwiczenia.

Wyniki badań i analiz prezentowane przez Koshelev i współpracowników wskazują, że zrozumieniu mechanizmu silnego kotwiczenia sieci wirów w materiałach nadprzewodnikowych wymaga dalszych badań i wyjaśnień [17]. Analizy i badania prezentowane przez Klaassen pokazują, że największą trudność sprawia odizolowanie jednego rodzaju centrów kotwiczenia od drugiego rodzaju centrów kotwiczenia. Odizolowanie poszczególnych centrów kotwiczenia od siebie umożliwiłoby wskazanie relację między poszczególnymi centrami kotwiczenia, pozwoliłoby opisać proces kotwiczenia siecią wirów w polach magnetycznych o różnej indukcji np. 5 T oraz umożliwiłoby wskazanie wpływu poszczególnych centrów kotwiczenia na gęstość prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych [30]. Powyższe wyniki badań wskazują, że jednym z najważniejszych pozostałych do rozwiązania problemów w nadprzewodnictwie jest lepsze zrozumienie interakcji sieci wirów z centrami kotwiczenia, poznanie właściwości poszczególnych centrów kotwiczenia, np. powierzchniowych, punktowych i liniowych centrów kotwiczenia oraz opracowanie metody, która pozwoliłby analizować centra kotwiczenia w polach magnetycznych o ściśle określonej indukcji. Rozwiązanie tego problemu pozwoliłoby znacznie zwiększyć gęstość prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych, w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji. Obniżyłoby to koszty produkcji przewodów nadprzewodnikowych oraz zwiększyłoby możliwości zastosowania przewodów nadprzewodnikowych w konstrukcji cewek nadprzewodnikowych.

4.3.2. Cel naukowy oraz osiągnięcie naukowe przedstawione w formie cyklu artykułów

Prezentowany cykl publikacji naukowych powstał po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora i skupiał się na badaniu oddziaływaniu sieci wirów z centrami kotwiczenia, parametrów krytycznych (temperatura krytyczna, nieodwracalne pole magnetyczne, górne pole magnetyczne), siły kotwiczenia, dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów i gęstości prądu krytycznego. W moich badaniach dużo uwagi poświęciłem morfologii i strukturze materiałów nadprzewodnikowych, które istotnie wpływają na parametry krytyczne i kotwiczenie sieci wirów. Prace badawcze powstały w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych PAN (we Wrocławiu), Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN (we Wrocławiu) podczas i po zakończeniu stażu w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN (w Warszawie). Ponadto badania były wykonywane w podczas krótkoterminowych staży w Institute for Solid State and Materials Research Dresden, (w Dreźnie, Niemczech). Prezentowane wyniki w publikacjach **[Q1-Q9]** były wykonywane we współpracy z zagranicznymi instytutami badawczymi: Institute for Superconducting and Electronic Materials, Australian Institute of Innovative Materials (AIIM), University of Wollongong, Australia, Hyper Tech Research, Inc., Columbus, Ohio, USA, Bolu Abant Izzet Baysal University, Department of Physics, Bolu, Turkey. Wszystkie artykuły są poświęcone przypinaniu sieci wirów na centrach kotwiczenia, morfologii materiałów nadprzewodnikowych oraz gęstości prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych. Uzyskane wyniki badań mogą być istotne dla osób badających zachowanie sieci

wirów w materiałach nadprzewodnikowych oraz rozważających projektowanie i konstruowanie cewek nadprzewodnikowych generujących silne pola magnetyczne. Prowadzone badania mają charakter interdyscyplinarny z pogranicza fizyki, chemii, inżynierii materiałowej.

Głównym celem pracy badawczej było zbadanie interakcji między siecią wirów i centrami kotwiczenia w stanie mieszanym oraz wpływu tej interakcji na siłę kotwiczenia i gęstość prądu krytycznego w wybranych przewodach nadprzewodnikowych.

Poszczególne cele badawcze zawarte w prezentowanym cyklu dotyczą poniższych zagadnień.

a) Zbadanie własności strukturalnych i morfologicznych materiałów nadprzewodnikowych.
b) Pomiary parametrów krytycznych: temperatury krytycznej, nieodwracalnego pola magnetycznego, górnego pola krytycznego oraz oporu w stanie normalnym.
c) Pomiary transportowego prądu krytycznego w zakresie temperatur od 4.2 K do 30 K.
d) Obliczanie gęstości prądu krytycznego oraz siły kotwiczenia.
e) Analiza dominującego mechanizmu kotwiczenia za pomocą modelu Dew-Hughesa i Higuchiego.
f) Analiza kotwiczenia sieci wirów na punktowych i liniowych centrach kotwiczenia otrzymanych w wyniku domieszkowania i obróbki termicznej pod wysokim ciśnieniem izostatycznym w materiale MgB_2.
g) Istotnym elementem badań było wskazanie możliwości utworzenia odseparowanych centrów kotwiczenia w materiale nadprzewodnikowym NbTi, które lepiej pozwoliłyby poznać interakcje między określonym rodzajem centrów kotwiczenia i siecią wirów w polu magnetycznym o ściśle określonej indukcji.
h) Analiza możliwości ulepszenia obecnych modeli kotwiczenia sieci wirów w oparciu o badania własne.
i) Wskazanie wpływu poszczególnych centrów kotwiczenia na gęstość transportowego prądu krytycznego w wybranych przewodach nadprzewodnikowych.

Powyższe cele zostały osiągnięta przy wykorzystaniu

a) proszkowej dyfrakcji rentgenowskiej (XRD),
b) skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM)
c) spektroskopii rentgenowskiej z dyspersją energii (EDS)
d) transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM)
e) pomiarów parametrów krytycznych, które zostały wykonane za pomocą układu PPMS
f) pomiarów prądu krytycznego, które zostały przeprowadzone za pomocą magnesów Bittera i magnesów nadprzewodnikowych

Próbki materiału NbTi zostały wykonane za pomocą prasowania na gorąco oraz obróbki na zimno. Materiał NbTi posiadał dużą czystość i jednorodność. Kluczowym elementem było uzyskanie odseparowanych centrów kotwiczenia w materiale NbTi. Próbki MgB_2 do badań wykonano standardową metodą proszku w rurce oraz metodą wewnętrznej dyfuzji Mg używając materiałów o bardzo wysokiej czystości. Przewody nadprzewodnikowe MgB_2 wytworzono z nano boru i różnych rodzajów domieszek w celu uzyskania centrów kotwiczenia. Próbki wygrzewano w niskim i wysokim ciśnieniu izostatycznym w atmosferze argonowej. Kluczowym elementem wpływającym na czystość próbek było użycie barier dyfuzyjnych np. Nb i Fe, które znacząco redukują ilość zanieczyszczeń w materiałach nadprzewodnikowych. Ponadto wykonano obliczenia za pomocą modelów empirycznych, które pozwoliły wskazać rodzaj dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów w materiałach nadprzewodnikowych NbTi i MgB_2.

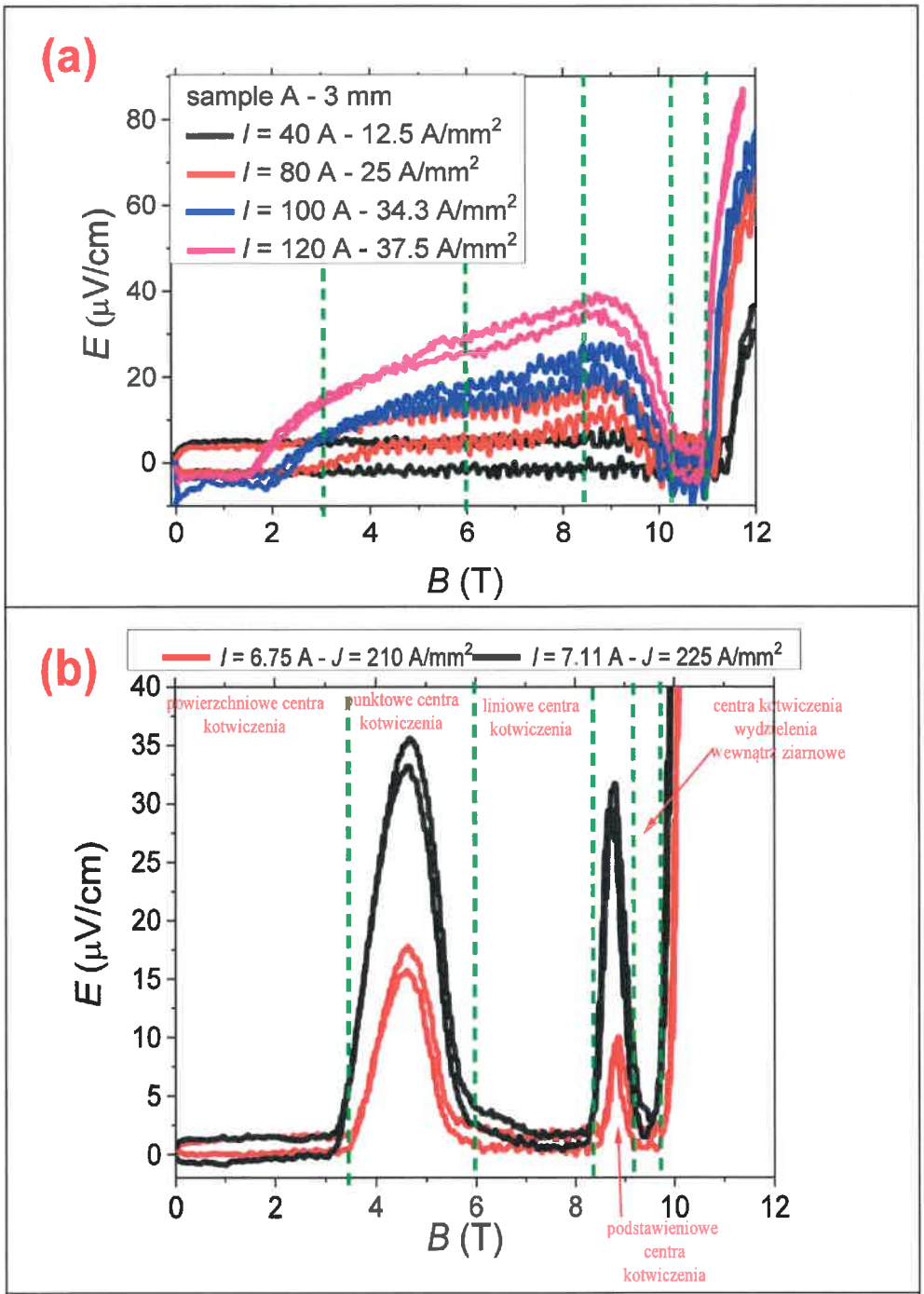
- *Badanie oddziaływania sieci wirów z odseparowanymi centrami kotwiczenia* ***[Q1]***

Obecnie bardzo ważnym i dotychczas nierozwiązanym zagadnieniem w materiałach nadprzewodnikowych, jest wskazanie oddziaływania sieci wirów z różnymi rodzajami centrów kotwiczenia. Cel ten można tylko osiągnąć, wykonując próbki z odizolowanymi centrami zakotwiczenia. Analizy wykonane przez Klassen [20] wskazały, że odseparowanie poszczególnych centrów kotwiczenia od siebie jest bardzo trudne, ponieważ różne centra kotwiczenia mogą silnie lub słabo kotwiczyć sieć wirów w tym samym zakresie indukcji magnetycznej. Odizolowanie poszczególnych centrów kotwiczenia pozwoliłoby lepiej zrozumieć i rozszerzyć wiedzę o procesie kotwiczenia sieci wirów w materiałach nadprzewodnikowych w polach magnetycznych o niskiej, średniej, jak i wysokiej indukcji. Ponadto lepsze poznanie procesu kotwiczenie sieci wirów na poszczególnych centrach kotwiczenia pozwoliłoby efektywniej zwiększać gęstość prądu krytycznego w polach magnetycznych o ściśle określonej indukcji, w zależności od wymogów aplikacyjnych. Uprościłoby to procesy produkcji przewodów nadprzewodnikowych. Obecnie w literaturze brakuje szczegółowych danych eksperymentalnych, które pozwoliłyby wyznaczyć zakresy indukcji magnetycznej, w których sieć wirów jest kotwiczona przez poszczególne centra kotwiczenia, takie jak punktowe, powierzchniowe i liniowe. Dodatkowo, w literaturze bardzo ogólne jest opisany wpływ liniowych centrów kotwiczenia na J_c w polach magnetycznych o wysokiej indukcji.

Próbki do badań odizolowanych centrów kotwiczenia zostały wyselekcjonowane na podstawie badań morfologii, mikrostruktury i składu materiałów nadprzewodnikowych NbTi, przeprowadzonych za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (elektronów wtórnych, elektronów wstecznych) transmisyjnego mikroskopu elektronowego, mikroanalizy rentgenowskiej (EDS). Badania te wykazały, że wybrana próbka o średnicy 3 mm zawiera fazę β NbTi (99%) i wydzielania wewnątrz ziarnowe Ti (Widmanstatten - 1%). W dalszym etapie badań przewód NbTi o średnicy 3 mm została przeciągnięty na zimno do średnicy 0.3 mm. Ten proces pozwolił wprowadzić do mikrostruktury materiału NbTi dyslokacje krystaliczne, które pozwolą zbadać interakcje sieci wirów z liniowymi centrami kotwiczenia w materiałach nadprzewodnikowych. Przewody NbTi wykonano ze stopu o składzie 40 at.% Nb i 60 at.% Ti w matrycy miedzianej [3A-5A, 7A,8A, 14B, 15B].

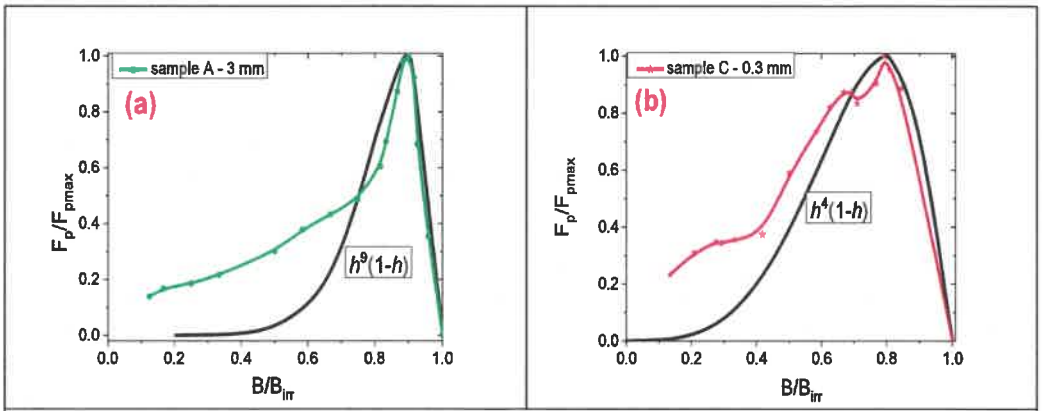
Wcześniejsze badania wskazały, że gęstość prądu krytycznego, nieodwracalna indukcja magnetyczna i siła kotwiczenia są skorelowane z procesem kotwiczenia sieci wirów w materiałach nadprzewodnikowych [7,9]. Wskazuje to, że pomiary prądu krytycznego pozwalają badać zachowanie sieci wirów w materiałach nadprzewodnikowych w stanie mieszanym. Obecnie stosowana metoda pomiaru prądu krytycznego nie pozwala badać odizolowanych centrów kotwiczenia i ich oddziaływania z siecią wirów w stanie mieszanym, ponieważ umożliwia pomiar tylko w polu magnetycznym o ściśle określonej indukcji. Podejście to nie pozwala określić zakresu pól magnetycznych, w których poszczególne centra kotwiczenia silnie lub słabo oddziałują z siecią wirów. **Przełomowe wyniki pomiarowe zostały otrzymane za pomocą autorskiej, zmodyfikowanej metody pomiaru prądu krytycznego [18A].** Metoda ta polega na pomiarze prądu krytycznego przy stałym natężeniu prądu oraz narastającym polu magnetycznym. Wartość prądu krytycznego wyznacza się na podstawie standardowego kryterium 1 μV/cm, analogicznie do klasycznej metody pomiaru prądu krytycznego, w której natężenie prądu jest zwiększane przy stałym polu magnetycznym **[18A]**. Wprowadzona ulepszona metoda pomiaru prądu krytycznego pozwoliła badać kotwiczenie sieci wirów na różnych rodzajach centrów kotwiczenia, ponieważ narastające pole magnetyczne, np. od 0 do 14 T prowadzi do wnikania kwantów strumienia (wirów) do materiałów nadprzewodnikowych **[Q1]**. Podczas jednego pomiaru można jednocześnie zaobserwować i zarejestrować oddziaływanie sieci wirów z różnymi centrami kotwiczenia, np. powierzchniowymi, punktowymi i liniowymi centrami kotwiczenia (Rys. 1). Przeprowadzone pomiary pokazały, że opracowanie próbki z odizolowanymi centrami kotwiczenia oraz zmodyfikowanie metody pomiaru prądu krytycznego pozwoliły wskazać oddziaływanie sieci wirów z odizolowanymi centrami kotwiczenia. Pomiary prądu krytycznego były wykonywane w temperaturze ciekłego helu. Ponadto wykonano pomiary temperatury krytycznej, nieodwracalnego pola magnetycznego, pomiary pętli histerezy oraz analizę dominującego mechanizmu kotwiczenia (Dew-

Hughes)[46]). Wyniki pomiarów przedstawione w artykule **[Q1]** pokazały, że można tak wytworzyć i zbadać centra kotwiczenia w przewodach NbTi, aby przypinały silnie sieć wirów niezależnie od siebie w różnych zakresach pól magnetycznych przy zastosowaniu zmodyfikowanej metody pomiaru prądu krytycznego. Przeprowadzone pomiary na Rys 1 (a) i (b) wskazały, że powierzchniowe centra kotwiczenia najefektywniej kotwiczą siec wirów w polu magnetycznym o niskiej indukcji, ponieważ pomimo zwiększanie siły Lorentza w zakresie tych pól magnetycznych pole elektryczne przyjmuje niemierzalną wartość **[Q1]**.



Rys. 1. Zależność pola elektrycznego (E) od zewnętrznego pola magnetycznego dla stałego natężenia prądu w temperaturze 4.2 K. (a) przewód NbTi o średnicy 3 mm, (b) przewód NbTi o średnicy 0.3 mm **[Q1]**.

Dalsze pomiary na Rys. 1(b) pokazują, że w zakresie indukcji od 3.5 T do 5 T pojawia się pole elektryczne, które wskazuje na ruch sieci wirów. Na podstawie tych pomiarów można zauważyć, że powierzchniowe centra kotwiczenia słabo kotwiczą sieć wirów w polach magnetycznych o średniej indukcji (Rys. 1(a)) **[Q1]**. Ruch sieci wirów w zakresie pola magnetycznego o indukcji od 3.5 T do 6 T jest spowodowany brakiem w mikrostrukturze materiału NbTi wydzieleni α – Ti miedzy ziarnowych, które silnie kotwiczą sieć wirów w pola magnetycznych o średniej indukcji [9,18]. Dalsze wyniki na Rys. 1(a) pokazują wyniki pomiaru prądu krytycznego dla przewodu o średnicy 3 mm oraz ruch sieci wirów w zakresie polach magnetycznych o indukcji od 3 T do 10 T. Zmniejszenie średnicy przewodu NbTi do 0,3 mm wprowadziło do mikrostruktury materiału dyslokacje krystaliczne, które umożliwiły przypinanie sieci wirów w zakresie indukcji pola magnetycznego od 6 T do 8 T (rys. 1(b)) **[Q1]**. Jest to pierwszy wynik pomiarowy, który tak precyzyjnie określa zakres pól magnetycznych, w których centra kotwiczenia tworzone przez dysłokacje krystaliczne skutecznie przypinają sieć wirów. Ponadto wykonane pomiary pokazują, że sieć wirów nie oddziałuje z liniowymi centrami kotwiczenia w polach magnetycznych o niskiej i średniej indukcji (0 T do 5 T). Dodatkowo przeprowadzone badania pokazały, że w zakresie indukcji magnetycznej od 8 T od 9.5 T pojawił się nowy rodzaj centrum kotwiczenia, który wcześniej nie został przedstawiony w literaturze, ponieważ pojawia się pole elektryczne (ruch sieci wirów – Rys. 1(b)) **[Q1]**. Ponadto ruch sieci wirów w zakresie indukcji od 8 T do 8.7 T wskazuje na słabe kotwiczenie sieci wirów przez dyslokacje w polach magnetycznych o indukcji powyżej 8 T. Wykonane analizy sugerują, że ten rodzaj centrów kotwiczenia może być tworzony w wyniku podstawienie atomów do sieci krystalicznej materiałów nadprzewodnikowych. Dalsze badania wskazały, że w zakresie indukcji magnetycznych od 9.5 T do 10 T najefektywniej sieć wirów kotwiczą wydzielania Ti wewnątrz ziarnowe (Rys. 1(b)). Pomiary na Rys. 1(b) pokazują ruch sieci wirów (pole elektryczne) w zakresie indukcji od 8.7 T do 9.5 T. To wskazuje, że wydzielenia wewnątrz ziarnowe Ti słabo kotwiczyć sieć wirów w polach magnetycznych o indukcji niższej niż 9.5 T (Rys. 1(b)). **Zaprezentowane wynik pomiarowe w artykule [Q1] są pierwszymi na świecie wynikami badawczymi, które tak dokładnie wskazują zakresy indukcji magnetycznych, w których sieć wirów oddziałuje z poszczególnymi centra kotwiczenia.**



Rys. 2. Zależność przeskalowanej siły zakotwiczenia od przeskalowanego pola magnetycznego (a) równanie opisujące dominujący mechanizm kotwiczenia sieci wirów na wydzieleniach wewnątrzziarnowych, (b) równanie opisujące mechanizm kotwiczenia sieci wirów przez defekty strukturalne powstające w wyniku podstawień w sieci krystalicznej. F_{pmax} – maksymalna siła kotwiczenia, B_{irr} – nieodwracalne pole magnetyczne **[Q1]**

Uzyskane wyniki pomiarowe pozwoliły rozszerzyć wiedze dotyczącą dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji. Przeprowadzone badania umożliwiły wprowadzenie nowych zależności opisujących wysoko polowe

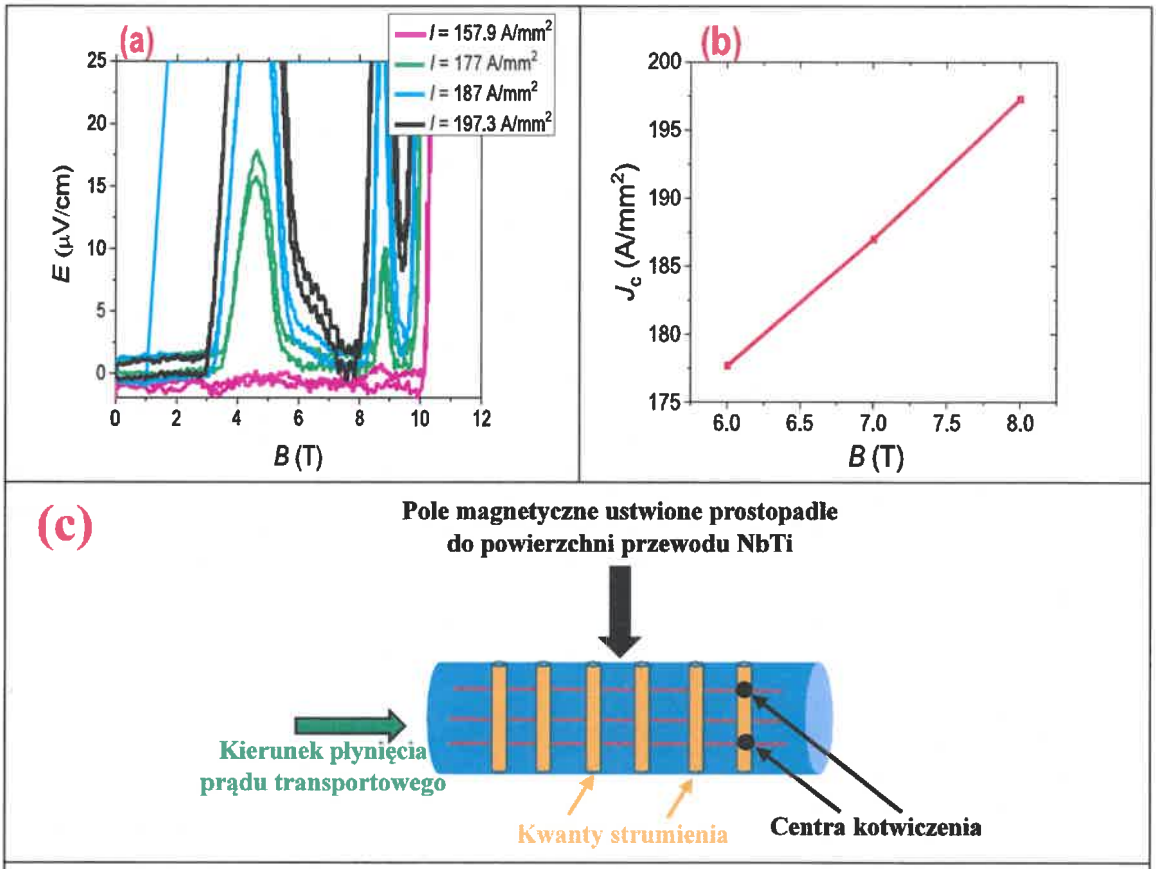
centra kotwiczenia, które dotychczas nie były prezentowane **[Q1]**. Te formuły opisują centra kotwiczenia tworzone przez podstawienie do sieci krystalicznej i wydzielenia wewnątrz ziarnowe (Rys. 2). Przeprowadzone badania pokazały, że centra kotwiczenia tworzone przez dyslokacje, podstawienia do sieci krystalicznej i wydzielenia wewnątrz ziarnowe kotwiczą sieć wirów tylko w polach magnetycznych o wysokiej indukcji oraz że nie mogą kotwiczyć sieci wirów w polach magnetycznych o niskiej i średniej indukcji. Ponadto badania pokazały, że powierzchniowe centra kotwiczenia mogą tylko kotwiczyć sieć wirów w polach magnetycznych o niskiej indukcji. **Do najważniejszych osiągnięć habilitanta należy wskazanie zakresów indukcji magnetycznej, w których sieć wirów oddziałuje z poszczególnymi centrami kotwiczenia.**

- *Wpływ ustawienia dyslokacji na siłę kotwiczenia sieci wirów w NbTi* ***[Q2]***

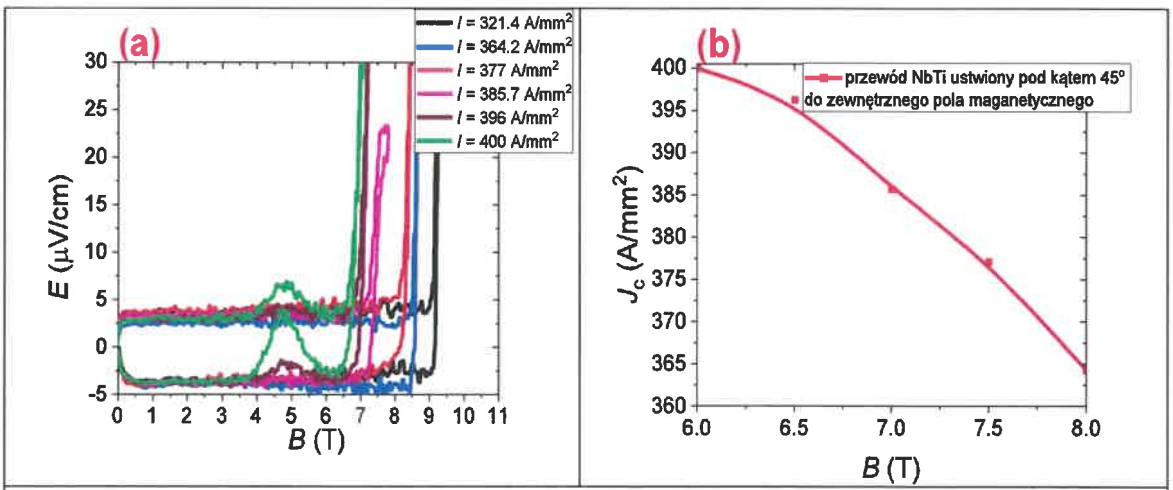
Przeprowadzone analizy przez Yamasaki i współpracowników. [39] pokazały, że dyslokacje krystaliczne ustawione równolegle do zewnętrznego pola magnetycznego najsilniej kotwiczą sieć wirów i najefektywniej zwiększają gęstości prądu krytycznego w materiałach nadprzewodnikowych. Uzyskane wyniki pomiarowe w artykule **Ref. Q1** pokazały, że dyslokacje krystaliczne najefektywniej kotwiczą sieć wirów w zakresie indukcji od 6 T do 8 T. Obecne badania jednak nie wskazały dokładnego wpływu kierunku ustawienia dyslokacji krystalicznych na kotwiczenie sieci wirów w zakresie indukcji od 6 T do 8 T. Poznanie wpływu kierunku dyslokacji na kotwiczenie sieci wirów pozwoli efektywniej zwiększać gęstości prądu krytycznego w polach magnetycznych o wysokiej indukcji.

Pomiary zostały wykonane dla przewodów NbTi, w których dyslokacje krystaliczne zostały ustawione równolegle do płynącego prądu transportowego i prostopadle do zewnętrznego pola magnetycznego **[Q2]**. Dyslokacje krystaliczne zostały ukierunkowane podczas procesu obróbki plastycznej na zimno [71,72]. Pomiary prądu krytycznego zostały wykonane zmodyfikowaną metodą pomiarową opracowaną przez habilitanta [18A]. Ta metoda pozwoliła zaobserwować zachowanie sieci wirów oraz jej oddziaływanie z dyslokacjami krystalicznymi w zakresie indukcji od 6 T do 8 T. Uzyskanie wyniki pomiarowe **Ref. Q2** pokazują, że zwiększenie gęstości prądu transportu od 177 A/mm^2 do 187 A/mm^2 (siły Lorentza) prowadzi do pojawienia się pola elektrycznego (ruch sieci wirów) w najpierw w polu magnetycznym o indukcji 6 T i 7 T, oraz że nie generuje pola elektrycznego w polu magnetycznym o indukcji 8 T (zakotwiczona sieć wirów) (Rys. 3(a)). Ruch sieci wirów w polu magnetycznym o indukcji 8 T jest obserwowany dla gęstości prądu powyżej 197.3 A/mm^2 (Rys. 3(a)). Te wyniki pokazują, że dyslokacje ustawione równolegle do płynącego prądu transportowego i prostopadle do zewnętrznego pola magnetycznego najsilniej kotwiczą sieć wirów w polu magnetycznym o indukcji 8 T **[Q2]**. Ten efekt prowadzi do zwiększenia gęstości prądu krytycznego w polach magnetycznych o wysokiej indukcji (Rys. 3(b)). Nie jest to typowe zachowanie gęstość prądu krytycznego w materiałach nadprzewodnikowych, ponieważ gęstości prądu krytycznego ulega zmniejszeniu ze wzrostem pola magnetycznego. Dalsze wyniki pomiarów pokazały, że ustawienie przewodu NbTi pod kontem 45° prowadzi do najefektywniejszego kotwiczenia sieci wirów przez dyslokacje w polu magnetycznym o indukcji 7 T i do wysokiej gęstości prądu krytycznego w polu magnetycznym o indukcji 7 T **[Q2]**. Ustawienie przewodu NbTi w równoległym polu magnetycznym nie pozwoliło zbadać oddziaływania sieci wirów z dyslokacjami, ponieważ w równoległym polu magnetycznym siła Lorentza jest równa zeru. Dalsze badania były wykonywane dla drutów NbTi, które były obrabiane za pomocą prasowanie wielokątowe w równych kanałach (ECMAP). Wykonane analizy pokazały, że proces wyginania przewodu NbTi pod trzema kątami zwiększa znacznie gęstość dyslokacji krystalicznych od 10^6 cm^{-2} do 10^{11} cm^{-2} [4A]. Przeprowadzone pomiary prądu krytycznego pokazały, że przewody te mają duża ilość dyslokacje ustawione pod kontem 45°. Ustawienie tych przewodów pod kątem 45° pozwoliło ustawić dyslokacje krystaliczne równolegle do zewnętrznego pola magnetycznego. Wyniki pomiarów na Rys. 4(a) pokazują, że tak ustawione dyslokacje najefektywniej kotwiczą sieć wirów w polu magnetycznym o indukcji 6 T **[Q2]**. Ponadto słabo kotwiczą sieć wirów w polu magnetycznym o indukcji 8 T. Wyniki na Rys. 4(b) pokazują, że gęstości prądu krytycznego zmniejsza się ze wzrostem pola magnetycznego. To jest charakterystyczne zachowania gęstości prądu krytycznego

w materiałach nadprzewodnikowych. Przeprowadzone badania pokazały, że ustawienie dyslokacji znacząco wpływa na siłę kotwiczenia sieci wirów oraz na gęstość prądu krytycznego.



Rys. 3. (a) Zależność pola elektrycznego od zewnętrznego pola magnetycznego, (b) zależność gęstości prądu krytycznego od zewnętrznego pola magnetycznego w temperaturze 4.2 K, (c) Schemat - dyslokacje ustawione prostopadle do zewnętrznego pola magnetycznego **[Q2]**.



Rys. 4. Zależność pola elektrycznego od zewnętrznego pola magnetycznego, (b) zależność gęstości prądu krytycznego od zewnętrznego pola magnetycznego w temperaturze 4.2 K. Dyslokacje ustawione równolegle do zewnętrznego pola magnetycznego **[Q2]**.

Najważniejszym osiągnieciem habilitanta jest wskazanie, że dyslokacje ustawione równolegle do zewnętrznego pola magnetycznego najefektywniej kotwiczą sieć wirów w polu magnetycznym o indukcji 6 T oraz pokazanie, że dyslokacje krystaliczne ustawione prostopadle do zewnętrznego pola magnetycznego najefektywniej kotwiczą sieć wirów w polu magnetycznym o indukcji 8 T. Jest to pierwszy wyniki pomiarowy, który tak dokładnie przedstawia oddziaływanie sieci wirów z centrami kotwiczenia, które tworzą dyslokacje krystaliczne.

- *Kotwiczenie sieci wirów na punktowych centrach kotwiczenia w ceramicznym nadprzewodnikowym materiale MgB_2 w temperaturze 20 K [Q3, Q4, Q5]*

Obecne prowadzone są intensywne poszukiwane materiałów nadprzewodnikowych, które miały by wysoką temperaturę krytyczną, prostą morfologię, tanie komponenty, wysokie pole magnetyczne nieodwracalne i wysoka gęstość prądu krytycznego w temperaturze ciekłego wodoru (20 K). Ostanie wyniki badań wskazują, że takim materiałem nadprzewodnikowym może być materiał MgB_2, który ma wysoka temperaturę krytyczna (39 K). Obecnie jednak przewody nadprzewodnikowego MgB_2 maja niska gęstości prądu krytycznego w temperaturze 20 K. Uzyskanie wysokiej gęstości prądu krytycznego w materiale MgB_2 w temperaturze 20 K wymaga znacznie lepszego poznania procesów kotwiczenia sieci wirów na punktowych centrach kotwiczenia, które są obecnie słabo poznane. Uzyskane wyniki dla odizolowanych centrów kotwiczenia **[Q1]** mogą pozwolić lepiej zrozumieć działanie punktowych centrów kotwiczenia w materiale nadprzewodnikowym MgB_2 w 20 K.

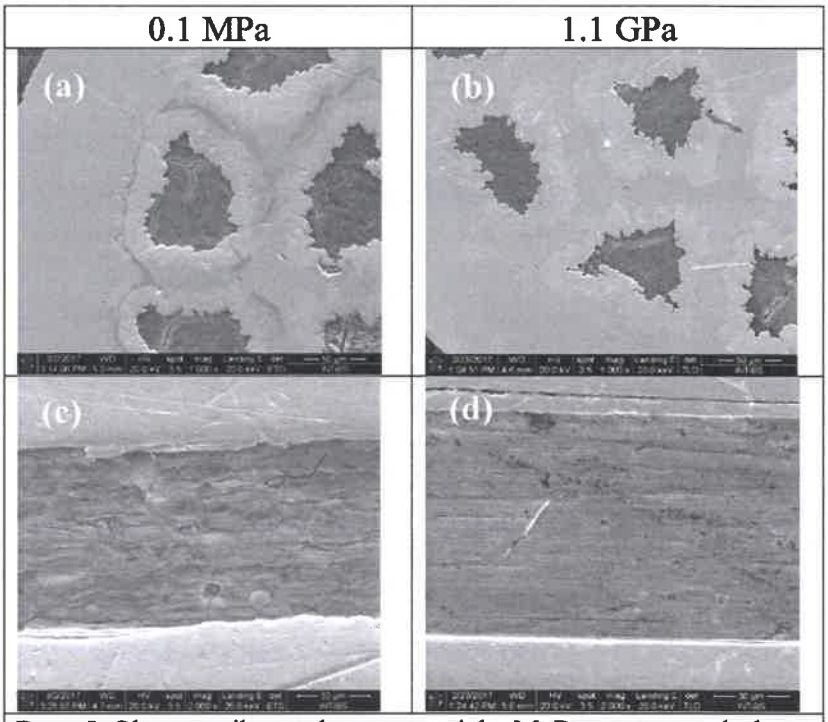
Pomiary prądu krytycznego były wykonywane w Institute for Solid State and Materials Research Dresden, Dresden, Germany oraz w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN na nowym układzie pomiarowym, który została zaprojektowany i skonstruowany przez habilitanta. Ten układ pomiarowy pozwala prowadzić pomiary prądu krytycznego w zakresie temperatur od 10 K do 100 K. Te możliwości badawcze pozwoliły prowadzić badania nad kotwiczeniem sieci wirów na punktowych centrach kotwiczenia w temperaturze 20 K. Ponadto dla materiału MgB_2 były wykonane pomiary parametrów krytycznych za pomocą układu pomiarowego PPMS, analiza mikrostruktury za pomocą skaningowego elektronowego mikroskopu (SEM), analiza rentgenowska za pomocą SEM, transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM), proszkowej analizy dyfraktometrii rentgenowskiej. Wcześniejsze moje badania przedstawione w moim doktoracie były skoncentrowane na otrzymaniu powierzchniowych i punktowych centrów kotwiczenia w materiale MgB_2 w temperaturze ciekłego helu [9A-14A, 17B -19B].

Zwiększenie temperatury od 4.2 K do 20 K prowadzi do zwiększenia długości koherencji od 5 nm (4.2 K) do 10 nm (20 K). To zmienia parametry dopasowania wirów do centrów kotwiczenia. Ponadto w materiałach nadprzewodnikowych ceramicznych zwiększenie temperatury znacznie osłabia połączenia miedzy ziarnowe, które wpływają także na gęstość prądu krytycznego oraz kotwiczenie sieci wirów. Wyniki badań teoretycznych wskazują, że bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na kotwiczenie sieci wirów w ceramicznych materiałach są obszary nadprzewodnikowe, które znajdują się obok centrów zakotwiczenia [9]. Analizy wykazały, że centrum kotwiczenia może silniej kotwiczyć sieć wirów, jeżeli na zewnątrz rdzenia znajduje się materiał nadprzewodnikowy mający wysokie parametry krytyczne (T_c, B_{irr}). Niestety materiał MgB_2 ma duża ilość pustek, które tworzą głównie powierzchniowe centra kotwiczenia. Te centra kotwiczenia znacznie zwiększają J_c w polach magnetycznych o niskiej indukcji i niskiej temperaturze. Ponadto puste przestrzenie, które powstają podczas reakcji syntezy znacznie osłabiają i zmniejszają ilość połączeń miedzy ziarnowych, co ma szczególne znaczenie w wysokich temperaturach 20 K i 30 K. Zrozumienie procesów kotwiczenia sieci wirów na punktowych centrach kotwiczenia w 20 K jest związane z uzyskaniem punktowych centrów kotwiczenia, ulepszeniem połączeń miedzy ziarnowych oraz uzyskaniem dużej ilości fazy nadprzewodnikowej MgB_2.

Istotnym problemem w przewodach nadprzewodnikowych MgB_2 jest silna reaktywność Mg z osłoną miedzianą lub monelową, która prowadzi do niekontrolowanego tworzenia się defektów strukturalnych (centra kotwiczenia). Defekty te powstają w sposób przypadkowy i znacznie utrudniają analizę kotwiczenia sieci wirów na centrach kotwiczenia. Proces powstawania obcych faz w

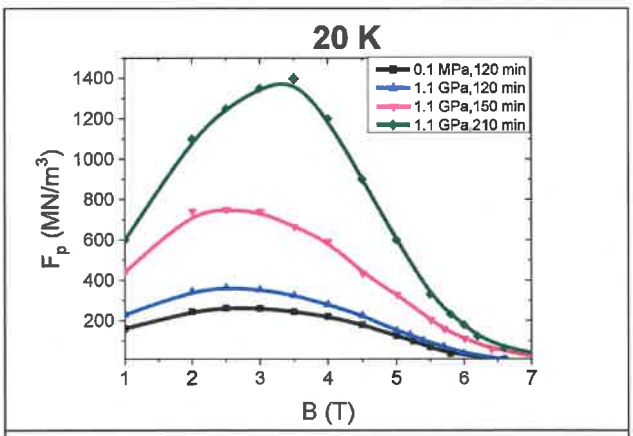
przewodach MgB_2 można zatrzymać, stosując bariery dyfuzyjne. Wszystkie badane przewody MgB_2 mają Nb lub Fe bariery dyfuzyjne, które pozwalają otrzymać materiał nadprzewodnikowy MgB_2 o wysokiej czystości. Jednakże czasami dochodzi do uszkodzenia bariery dyfuzyjnej Nb. Takie uszkodzenie uniemożliwia analizę procesu kotwiczenia sieci wirów oraz procesu tworzenia centrów kotwiczenia. Wcześniejsze badania prowadzone przez habilitanta pozwoliły opracować metodę wykrywania uszkodzeń w Nb barierze dyfuzyjnej [18A, 21A – 23A]. To pozwoliło prowadzić badania nad procesem kotwiczenia sieci wirów i centrami kotwiczenia w przewodach ze szczelnymi barierami dyfuzyjnymi i uzyskać prawidłowe wyniki pomiarowe.

Przeprowadzone analizy morfologii niedomieszkowanego materiału MgB_2 wskazały, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym może ulepszyć połączenia międzyziarnowe, zredukować ilość dużych pustych przestrzeni oraz pozwolić uzyskać punktowe centra kotwiczenia **[Q3]**. Wygrzewanie próbek MgB_2 pod wysokim ciśnieniem izostatycznym było wykonywane w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN w Warszawie podczas długoterminowego stażu oraz podczas krótkoterminowych staży naukowych w latach od 2008 do 2016. Przeprowadzone badania za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego na Rys. 5 pokazały po raz pierwszy, że wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym 1.1 GPa (HIP proces) w temperaturze 570 °C przez 210 minut pozwala zredukować powierzchnię materiału nadprzewodnikowego o 30% oraz średnicę włókien nadprzewodnikowych o 15% **[Q3]**. To prowadzi do znacznego zwiększenia gęstości materiału nadprzewodnikowego, ulepszenia i zwiększenia ilości połączeń międzyziarnowych, znacznego zmniejszenia ilości dużych pustych przestrzeni, poprawia jednorodność materiału MgB_2 w przewodzie i pozwala na otrzymanie ziaren nadprzewodnikowych o małych rozmiarach. Duża ilość połączeń międzyziarnowych, znaczna redukcja ilości pustych przestrzeni i małe ziarna mogą pozwolić uzyskać dużą ilość defektów strukturalnych na granicach ziaren. Wykonane pomiary transportowe za pomocą układu pomiarowego PPMS pokazały, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym i znaczna redukcja powierzchni materiału nadprzewodnikowego nie wpływa na temperaturę krytyczną, która wynosi 34.5 K **[Q3]**.



Rys. 5 Obrazy mikrostruktury materiału MgB_2 w przewodach po obróbce termicznej pod ciśnieniem izostatycznym 0.1 MPa i 1.1 GPa w temperaturze 570 °C (a) i (b) przekrój poprzeczny, (c) i (d) przekrój wzdłużny **[Q3]**.

Dalsze pomiary transportowe pokazały, że wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym (HIP) oraz znaczne zwiększenie gęstości materiału nadprzewodnikowego pozwala zwiększyć B_{irr} o 15 % poniżej temperatury 25 K oraz nie zwiększa B_{irr} powyżej 25 K **[Q3]**. Wartość B_{irr} jest zależna od rodzaju centrów kotwiczenia i wskazuje pole magnetyczne, w którym gęstość prądu krytycznego zanika do zera. Zwiększenie B_{irr} poniżej temperatury 25 K wskazuje, że proces HIP w materiale MgB_2 tworzy centra kotwiczenia, które ulepszają kotwiczenie sieci wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji poniżej temperatury 25 K **[Q3]**. Pomiary prądu krytycznego pokazały, że wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym i znaczna redukcja powierzchni materiału nadprzewodnikowego pozwala znacznie zwiększyć transportową krytyczną gęstość prądu od 100 A/mm^2 do 500 A/mm^2 w 3 T i 20 K, znacznie zwiększyć siłę kotwiczenia 250 MN/m^3 do 1400 MN/m^3 w 3 T i 20 K oraz pozwoliło przesunąć maksimum siły kotwiczenia od 2.5 T do 3.5 T w 20 K (Rys. 6) **[Q3]**. Wykonane analizy dominującego mechanizmu kotwiczenia za pomocą metody Dew – Hughes [46] wskazały, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem 1.1 GPa oraz znaczna redukcja powierzchni materiału nadprzewodnikowego tworzy dominujący punktowy mechanizm kotwiczenia sieci wirów w 20 K **[Q3]**. Punktowe centra kotwiczenia w materiale nadprzewodnikowym mogą tworzyć wytrącenia, domieszki lub puste przestrzenie, których grubość jest zbliżona do długości koherencji. Badane przewody w artykule **[Q3]** nie były domieszkowane. To wskazuje, że punktowe centra kotwiczenia na granicach ziaren mogą tworzyć puste przestrzenie, mające rozmiary zbliżone do długości koherencji (10 nm). Na podstawie tych wyników można wskazać, że wysoka transportowa gęstość prądu krytycznego oraz wysoka siła kotwiczenia w 20 K została uzyskana w wyniku silnego kotwiczenia sieci wirów na punktowych centrach kotwiczenia. To pokazuje, że punktowe centra kotwiczenia w materiale MgB_2 mogą efektywnie przypinać sieć wirów w 20 K.



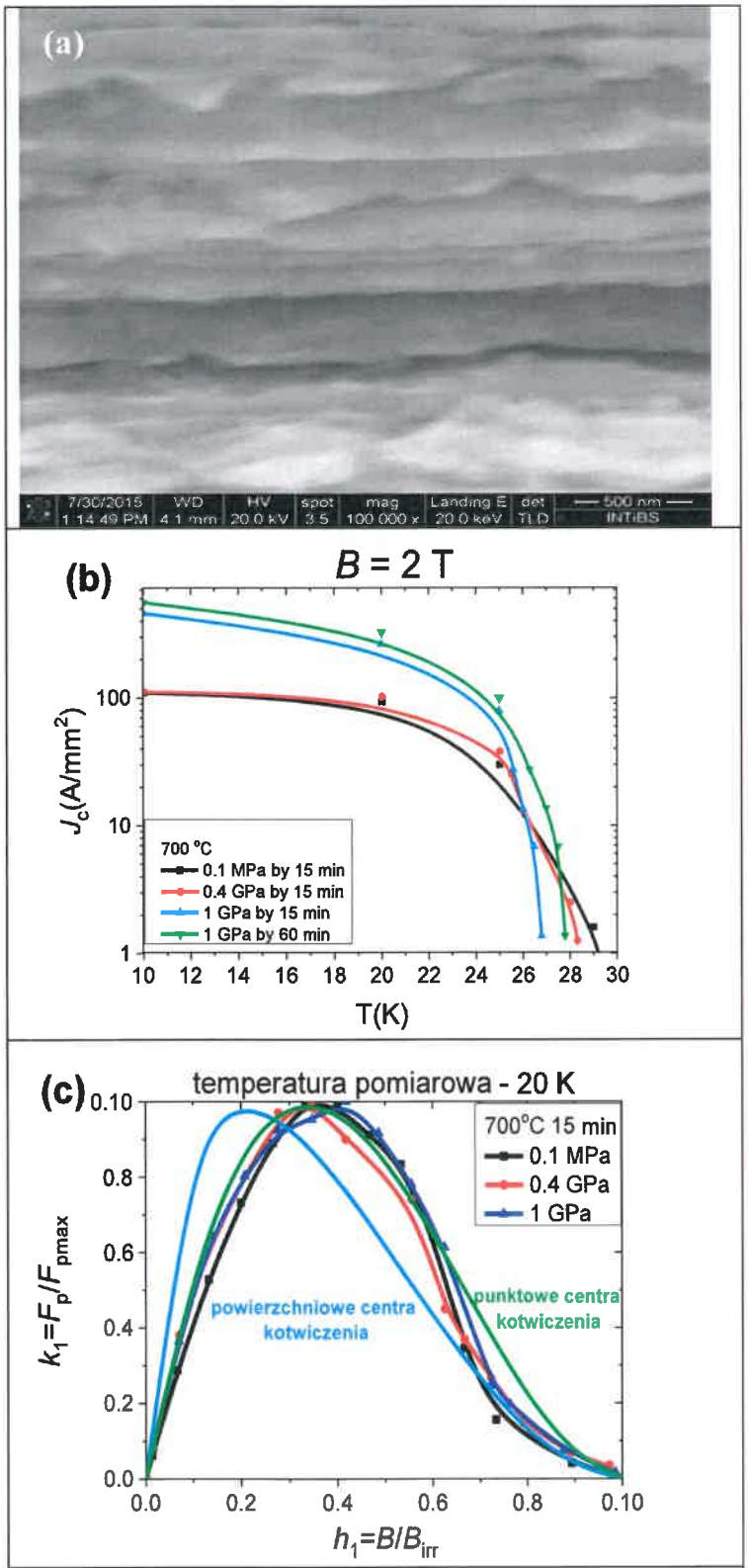
Rys. 6. Zależność siły kotwiczenia od pola magnetycznego w temperaturze 20 K **[Q3]**.

Wyniki w publikacji **[Q3]** wskazują, że poprawa efektywności kotwiczenia sieci wirów w materiale MgB_2 została także osiągnięta w wyniku znacznej redukcji wielkości pustych przestrzeni, które osłabiają połączenia międzyziarnowe oraz ulepszeniu materiału nadprzewodnikowego MgB_2 na granicach ziaren. Ulepszenie to także wynika ze znacznego zwiększenia jednorodności materiału MgB_2 po wygrzewaniu w wysokim ciśnieniu izostatycznym (Rys. 5) **[Q3]**. **Najważniejszym osiągnięciem habilitanta jest wykazanie, że sieć wirów w temperaturze 20 K może być przypinana przez punktowe centra kotwiczenia powstające podczas procesu wygrzewania pod wysokim ciśnieniem izostatycznym w niedomieszkowanym materiale MgB_2.**

Niedomieszkowane przewody MgB_2 mają niską gęstość prądu w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji w temperaturze 20 K [20A, 24A, 31A, 48A, 21B]. To znacznie ogranicza ich możliwości aplikacyjne. Kluczowym problemem, który należy rozwiązać, jest uzyskanie dużej gęstości punktowych centrów kotwiczenia oraz dużej ilości połączeń międzyziarnowych, które pozwolą

silnie kotwiczyć sieć wirów oraz uzyskać wysoką gęstość prądu krytycznego w 20 K. To sprawiłoby, że przewody MgB_2 byłyby bardziej konkurencyjne niż inne przewody nadprzewodnikowe w temperaturze 20 K. Przeprowadzone badania wskazały, że domieszkowanie węglem (C) pozwala zwiększyć nieodwracalne pole magnetyczne (B_{irr}) i górne pole magnetyczne (B_{c2}) [25]. Domieszkowanie jednak nie pozwala zmniejszyć ilości pustych przestrzeni i ulepszyć połączeń międzyziarnowych podczas procesu wygrzewania pod ciśnieniem atmosferycznym. Na podstawie wyników badań otrzymanych dla niedomieszkowanych przewodów MgB_2 po wygrzewaniu pod ciśnieniem izostatycznym podjęte zostały badania, które miały na celu jednoczesne zwiększenie gęstości materiału MgB_2 oraz zwiększenie gęstości centrów kotwiczenia **[Q4]**. To zagadnienie zostało zbadane dla domieszkowanych węglem (2at. % C) przewodów MgB_2, które były wygrzewane w temperaturze 700 °C pod ciśnieniem izostatycznym 0,1 MPa, 0,4 GPa i 1 GPa **[Q4]**. Wykonane badania przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) wykazały, że morfologia materiału MgB_2 w przewodzie po wygrzewaniu pod ciśnieniem 1,0 GPa w temperaturze 700 °C ma charakter warstwowy, a włókna posiadają grubość około 250 nm [**Q4**, 52A]. Obrazy SEM na Rys. 7(a) pokazują, że taka warstwowa struktura umożliwia uzyskanie dużej liczby połączeń między warstwowych [38A, 52A]. Tworzy to wiele ścieżek dla prądu transportowego oraz zwiększa powierzchnię granic ziaren i warstw. Dalsze badania wykazały, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym 1 GPa w temperaturze 700 °C nie powoduje zmniejszenia średnicy ani powierzchni materiału nadprzewodnikowego w domieszkowanych węglem przewodach MgB_2. Pomiary wykonane za pomocą układu PPMS wskazały, że domieszkowanie oraz obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym obniżają temperaturę krytyczną (T_c). Kolejne pomiary transportowe, wykonane z użyciem PPMS, wykazały, że wygrzewanie domieszkowanych węglem przewodów MgB_2 pod wysokim ciśnieniem izostatycznym prowadzi do zwiększenia wartości B_{irr} i Bc_2 poniżej 20 K oraz do ich obniżenia powyżej 25 K. Wartość B_{irr} jest skorelowana z kotwiczeniem sieci wirów na centrach kotwiczenia. Na tej podstawie można stwierdzić, że wysokie ciśnienie izostatyczne oraz domieszka węgla skuteczniej poprawiają kotwiczenie sieci wirów w zakresie temperatur od 4,2 K do 20 K **[Q4]**. Wpływ ten jest nieznaczny w przedziale 20–25 K, natomiast powyżej 25 K obserwuje się pogorszenie kotwiczenia sieci wirów. Wyniki pomiarów gęstości prądu krytycznego w temperaturach 10 K, 20 K i 25 K potwierdzają powyższe obserwacje. Dla 10 K, w polu magnetycznym o indukcji 4 T, wartość J_c wzrasta z 100 A/mm² (0,1 MPa) do 400 A/mm² (1 GPa). W temperaturze 20 K, w polu magnetycznym 4,5 T, obserwuje się zwiększenie J_c z 30 A/mm² do 100 A/mm², natomiast przy 25 K, w polu magnetycznym o indukcji 2 T, występuje jedynie niewielki wzrost J_c z 50 A/mm² do 70 A/mm² **[Q4]**. Uzyskane wyniki wskazują, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym w połączeniu z domieszkowaniem węglem znacząco poprawia kotwiczenie sieci wirów na centrach kotwiczenia w zakresie temperatur od 10 K do 20 K (rys. 7(b)), natomiast powyżej 28 K powoduje jego pogorszenie (rys. 7(b)) **[Q4]**.

Wykonane analizy dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów, przeprowadzone metodą Dew-Hughes (Rys. 7(c)) [46] oraz metodą Higuchi i współpracowników [47], wykazały, że wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym oraz domieszkowanie węglem prowadzi do powstania dużej liczby punktowych centrów kotwiczenia. Centra te tworzą defekty strukturalne o grubości zbliżonej do długości koherencji. Wskazuje to, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem w przewodach MgB_2 domieszkowanych węglem powoduje powstawanie obszarów normalnych o rozmiarach porównywalnych z długością koherencji (około 10 nm). Na tej podstawie można stwierdzić, że w temperaturze 20 K sieć wirów jest silnie kotwiczona przez punktowe centra kotwiczenia, co znacząco zwiększa gęstość prądu krytycznego J_c w tej temperaturze **[Q4]**. **Kolejnym ważnym osiągnieciem habilitanta jest pokazanie, że sieć wirów w 20 K może być efektywnie kotwiczona przez punktowe centra kotwiczenia, które tworzy niską ilość domieszki C oraz obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym.**



Rys. 7. (a) Morfologia materiału MgB_2 w przewodzie nadprzewodnikowym po obróbce termicznej pod wysokim ciśnieniem izostatycznym 1 GPa, (b) Zależność gęstości prądu krytycznego od temperatury w polu magnetycznym o indukcji 2 T, (c) (b) Analiza dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów metodą Dew-Hughes **[Q4]**.

Porównując wyniki przedstawione w artykułach **Q3** i **Q4**, można zauważyć, że domieszkowanie węglem (C) oraz obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym (bez redukcji powierzchni MgB_2) pozwalają uzyskać gęstości prądu krytycznego (J_c) w temperaturze 20 K bardzo zbliżoną do wartości J_c w niedomieszkowanych przewodach MgB_2, których powierzchnia materiału nadprzewodnikowego MgB_2 po wygrzewaniu pod wysokim ciśnieniem izostatycznym uległa zmniejszeniu o około 30%. Wyniki te wskazują, że domieszka węgla umożliwia efektywne przypinanie sieci wirów w temperaturze 20 K w materiale MgB_2. Ponadto badania sugerują, że jeszcze silniejsze przypięcie sieci wirów w tej temperaturze może zostać osiągnięte poprzez dalsze zmniejszenie powierzchni domieszkowanego węglem materiału nadprzewodnikowego MgB_2.

W kolejnym etapie badań podjęto próbę kotwiczenia sieci wirów na punktowych centrach kotwiczenia wytworzonych za pomocą domieszkowania tlenkiem ziem rzadkich. Wcześniejsze badania przeprowadzone dla masywnych próbek wykazały, że tlenek samaru (Sm_2O_3) może umożliwić tworzenie centrów kotwiczenia w materiale MgB_2 oraz że nie obniża temperatury krytycznej (T_c) tego nadprzewodnikowego materiału [56A, 73, 74]. **W tym celu po raz pierwszy na świecie wykonano przewody MgB_2 z 2 at.% domieszką Sm_2O_3 metodą proszku w rurce (PIT) [Q5]**. Badania morfologii i struktury, przeprowadzone za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM) oraz analizy dyfrakcji rentgenowskiej proszku (XRPD), wykazały po raz pierwszy, że gęstość nieprzereagowanych proszków w przewodzie ma istotny wpływ na proces tworzenia fazy nadprzewodnikowej MgB_2. Wysoka gęstość proszku spowalnia formowanie się fazy nadprzewodnikowej MgB_2 w przewodzie. Dalsze badania XRPD wskazały, że domieszka Sm_2O_3 pozwala uzyskać większą ilość fazy nadprzewodnikowej MgB_2 w przewodzie. **Wyniki uzyskane metodą TEM po raz pierwszy ujawniły obecność prostokątnych krystalitów MgB_2 w niedomieszkowanym materiale MgB_2, co nie było dotąd raportowane w literaturze [Q5].** Struktury te mogą odgrywać istotną rolę przy analizie centrów kotwiczenia. Dalsze badania z wykorzystaniem TEM oraz dyfrakcji elektronowej (SAED) wykazały, że niedomieszkowane przewody MgB_2 zawierają czysty, nieprzereagowany magnez oraz fazę nadprzewodnikową MgB_2. Z kolei wyniki TEM i SAED dla przewodów MgB_2 domieszkowanych Sm_2O_3 pokazały, że obszary sąsiadujące z domieszką Sm_2O_3 zbudowane są wyłącznie z fazy nadprzewodnikowej MgB_2 – bez obecności czystego magnezu i prostokątnych krystalitów MgB_2. **Otrzymane wyniki po raz pierwszy dowodzą, że domieszka Sm_2O_3 nie tylko tworzy punktowe centra kotwiczenia, ale również umożliwia powstawanie czystej fazy nadprzewodnikowej MgB_2 w obszarach międzyziarnowych oraz na granicy z domieszką oraz na zewnątrz centrów kotwiczenia [Q5]. Prowadzi to do istotnego zwiększenia skuteczności kotwiczenia sieci wirów przez centra kotwiczenia**. Jest to pierwsze na świecie doniesienie, które wskazuje na podwójną rolę domieszki Sm_2O_3: tworzenie centrów kotwiczenia oraz wspomaganie formowania fazy nadprzewodnikowej MgB_2. Wyniki te pokazują również, w jaki sposób można rozwiązać problem słabych połączeń międzyziarnowych w materiale MgB_2.

Przeprowadzone badania za pomocą systemu PPMS wskazują, że wartości T_c, B_{irr} oraz B_{c2} w domieszkowanych i niedomieszkowanych przewodach rosną wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania. Wyniki te nie wykazują jednak znaczącego wpływu domieszkowania na wartości B_{irr} i B_{c2} **[Q5]**. Mogłoby to sugerować, że domieszka Sm_2O_3 nie poprawia kotwiczenia sieci wirów. Jednak pomiary gęstości prądu krytycznego, przeprowadzone w temperaturach 15 K, 20 K, 25 K i 30 K, wykazały, że domieszka Sm_2O_3 znacząco zwiększa wartość prądu krytycznego w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji **[Q5]**. Szczególnie istotne są wyniki uzyskane w temperaturze 30 K, gdzie próbki domieszkowane Sm_2O_3 osiągają wysoką gęstość prądu krytycznego rzędu 10 A/mm^2 w polu 1 T, podczas gdy niedomieszkowane przewody MgB_2 charakteryzują się bardzo niską gęstością prądu krytycznego. Uzyskane wyniki są zgodne z obserwacjami z badań TEM i XRPD **[Q5]**. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że domieszka Sm_2O_3 sprzyja tworzeniu połączeń nadprzewodnikowych MgB_2 o wysokich parametrach krytycznych. Analiza dominującego mechanizmu kotwiczenia sieci wirów, przeprowadzona metodą Dew-Hughesa [46], wykazała, iż domieszka Sm_2O_3 tworzy dużą liczbę punktowych centrów kotwiczenia. Centra te są generowane w obszarach domieszki Sm_2O_3, których grubość zbliża się do długości koherencji (około 10 nm w temperaturze 20 K). Badania

przeprowadzone z wykorzystaniem transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM) ujawniły, że domieszka Sm_2O_3 tworzy obszary o rozmiarach w zakresie 10–20 nm. Uzyskane wyniki wskazują, że sieć wirów może być efektywnie kotwiczona w temperaturach 20 K, 25 K oraz 30 K przez punktowe centra kotwiczenia tworzone przez domieszkę Sm_2O_3 **[Q5]**. Dodatkowo, przeprowadzone badania wykazały, że w ceramicznych materiałach nadprzewodnikowych efektywność kotwiczenia sieci wirów jest uzależniona od obecności obszarów nadprzewodnikowych, które znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie obszarów normalnych, pełniących rolę centrów kotwiczenia. **Najważniejszym osiągnięciem habilitanta jest wykazanie, że domieszka Sm_2O_3 tworzy punktowe centra kotwiczenia, które skutecznie przypinają sieć wirów w zakresie temperatur od 20 K do 30 K. Kolejnym istotnym osiągnięciem habilitanta jest wykazanie, że domieszka Sm_2O_3 wykazuje właściwości katalityczne, umożliwiające uzyskanie większej zawartości fazy nadprzewodnikowej MgB_2 w przewodach nadprzewodnikowych [Q5].**

Porównując dominujący mechanizm kotwiczenia sieci wirów w temperaturze 20 K na punktowych centrach kotwiczenia, zaprezentowany w artykułach **Q4** i **Q5**, można zauważyć, że tworzenie centrów kotwiczenia w domieszkowanych węglem przewodach MgB_2 było związane ze wzrostem wartości B_{irr}. Z kolei punktowe centra kotwiczenia tworzone przez domieszkę Sm_2O_3 nie prowadzą do zwiększenia B_{irr}. Wyniki te wskazują, że pomiary wykonane za pomocą systemu PPMS nie pozwalają na efektywne badanie centrów kotwiczenia. Otrzymane wyniki sugerują, że jedynie pomiar prądu krytycznego I_c pozwala na pełniejsze zrozumienie i identyfikację rodzajów centrów kotwiczenia, które najefektywniej kotwiczą sieć wirów w materiale MgB_2 w temperaturze 20 K. Ponadto uzyskane wyniki pokazują, że różne rodzaje domieszek będą odmiennie wpływać na morfologię materiału MgB_2, w tym na połączenia międzyziarnowe, wielkość ziaren oraz tworzenie fazy nadprzewodnikowej MgB_2. Wskazuje to na czynniki utrudniające tworzenie punktowych centrów kotwiczenia zdolnych do efektywnego kotwiczenia sieci wirów w temperaturze 20 K.

Podsumowując przeprowadzone badania dla punktowych centrów kotwiczenia w materiale MgB_2 w 20 K można wykazały, że domieszka węgla nie tylko tworzy punktowe centra kotwiczenia, ale także prowadzi do powstania centrów kotwiczenia wskutek podstawiania atomów węgla (C) za bor (B) w strukturze MgB_2. Proces ten prowadzi do obniżenia T_c materiału nadprzewodnikowego MgB_2 w obszarach międzyziarnowych oraz w pobliżu punktowych centrów kotwiczenia tworzonych przez wytrącenia węgla. Z kolei domieszka Sm_2O_3 tworzy punktowe centra kotwiczenia, nie powodując obniżenia wartości T_c. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie materiału nadprzewodnikowego MgB_2 o wysokiej T_c zarówno na granicach ziaren, jak i w bezpośrednim sąsiedztwie wtrąceń Sm_2O_3. Zachowanie obszarów znajdujących się w pobliżu centrów kotwiczenia ma kluczowe znaczenie, ponieważ wpływa na efektywność kotwiczenia sieci wirów, zwłaszcza w wyższych temperaturach. Jest to wynikiem faktu, że nadprzewodzące prądy wiru muszą płynąć przez obszary, w których materiał zachowuje właściwości nadprzewodzące. Obniżenie T_c wskutek domieszkowania węglem prowadzi do spadku T_c w obszarach sąsiadujących z centrami kotwiczenia, co obniża ich efektywność w kotwiczeniu sieci wirów w temperaturach powyżej 20 K. Z drugiej strony, domieszka Sm_2O_3 umożliwia uzyskanie wyższej T_c w materiale MgB_2, co korzystnie wpływa na obszary nadprzewodnikowe znajdujące się w pobliżu centrów kotwiczenia. To z kolei zwiększa efektywność kotwiczenia sieci wirów, szczególnie w wyższych temperaturach. Uzyskane wyniki wskazują, że punktowe centra kotwiczenia powstałe w wyniku domieszkowania węglem najefektywniej kotwiczą sieć wirów w niskich i średnich temperaturach (do 20 K). Z kolei punktowe centra kotwiczenia tworzone przez domieszkę Sm_2O_3 wykazują najwyższą efektywność w kotwiczeniu sieci wirów w temperaturach powyżej 20 K. **Istotnym osiągnięciem habilitanta jest wykazanie, że różne typy domieszek tworzą punktowe centra kotwiczenia, które skutecznie przypinają sieć wirów w odmiennych zakresach temperatur [Q3,Q4,Q5].**

- *Opracowanie i udoskonalenie metody analizy centrów kotwiczenia na podstawie wyników przedstawionych w artykułach Q1 i Q2.*

Obecnie stosowane metody analizy kotwiczenia sieci wirów na centrach kotwiczenia pozwalają jedynie badać wpływ centrów kotwiczenia, których liczba jest największa w mikrostrukturze materiału nadprzewodnikowego, np. metody Dew-Hughesa [46] czy Higuchiego i współpracowników [47]. Te metody nie umożliwiają jednak analizy kotwiczenia sieci wirów przez pozostałe centra kotwiczenia występujące w mikrostrukturze materiałów nadprzewodnikowych. To znacząco utrudnia badania dotyczące wpływu tych innych centrów kotwiczenia na gęstość prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych. Poszerzenie wiedzy oraz metod badawczych jest niezbędne dla lepszego zrozumienia procesów kotwiczenia sieci wirów w materiałach nadprzewodnikowych. Taka wiedza pozwoliłaby na efektywniejsze kotwiczenie sieci wirów oraz uzyskiwanie wyższej gęstości prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych, co z kolei znacząco zwiększyłoby ich potencjał aplikacyjny.

Na podstawie wyników uzyskanych w artykułach **Q1** i **Q2** opracowano został ulepszony model kotwiczenia sieci wirów w przewodach nadprzewodnikowych przez habilitanta, który umożliwia analizowanie interakcji między siecią wirów a poszczególnymi centrami kotwiczenia. Model ten oparty jest na trzech podstawowych założeniach. Pierwsze założenie dotyczy gęstości prądu krytycznego **[Q6]**. Zakłada ono, że gęstość prądu krytycznego zależy od gęstości centrów kotwiczenia. Wyższa gęstość centrów kotwiczenia prowadzi do silniejszego przypięcia sieci wirów. Drugie założenie dotyczy skalowania pola magnetycznego. Polega to na podzieleniu pola magnetycznego, w którym został wykonany pomiar prądu krytycznego przez nieodwracalne pole magnetyczne (B_{irr}). Stosowane jest nieodwracalne pole magnetyczne (B_{irr}), ponieważ B_{irr} oznacza pole magnetyczne, w którym gęstość prądu krytycznego zanika do zera. Ponadto, B_{irr} jest ściśle związane z temperaturą, w której wykonywany jest pomiar prądu krytycznego. W tym modelu kluczowe znaczenie ma poprawne wyznaczenie wartości B_{irr}, która decyduje o poprawności przeprowadzonej analizy kotwiczenia sieci wirów. Trzecie założenie odnosi się do zakresów pól magnetycznych, w których poszczególne centra kotwiczenia najefektywniej kotwiczą sieć wirów. Zakresy te zostały uzyskane na podstawie pomiarów prądu krytycznego, które zostały zaprezentowane w artykule naukowym **Q1 i Q2** oraz w Tabeli 1 i na Rys 8. Metoda ta umożliwia analizę mechanizmu kotwiczenia sieci wirów w ściśle określonej temperaturze np. w 20 K. To założenie stanowi wyróżnik proponowanego modelu spośród innych modeli kotwiczenia sieci wirów. Model ten jest autorskim modelem zaproponowanym przez habilitanta do analizy mechanizmów kotwiczenia sieci wirów przez poszczególne centra kotwiczenia.

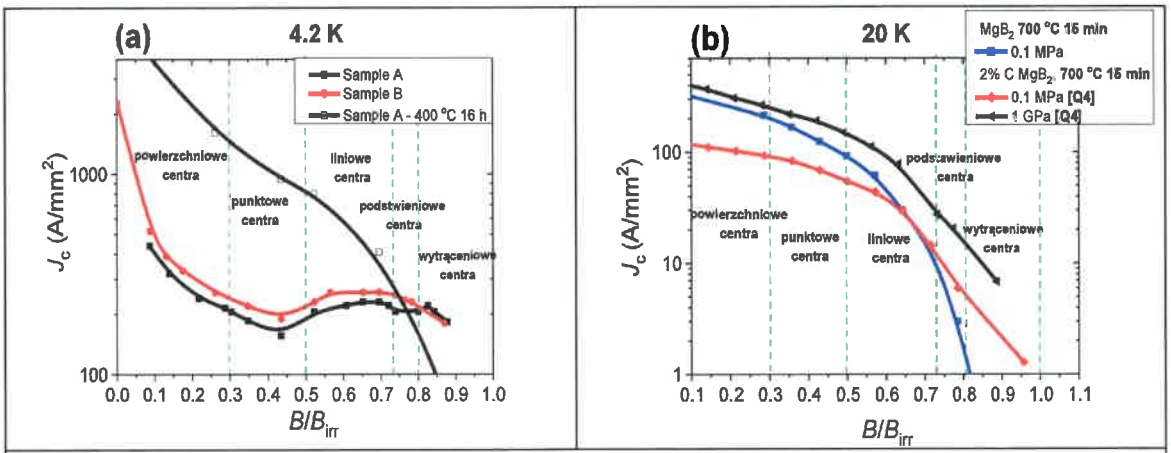
Zakres zredukowanego pola magnetycznego (B/B_{irr})	Rodzaj centrów kotwiczenia
0 – 0.3	powierzchniowe centra
0.3 – 0.5	punktowe centra
0.5 – 0.73	liniowe centra
0.73 – 0.8	podstawieniowe centra
0.8 - 1	wydzieleniowe centra wewnątrz ziaren nadprzewodnikowych

Tabela 1 przedstawia zakresy zredukowanego pola magnetycznego B/B_{irr} oraz odpowiadające im rodzaje centrów kotwiczenia. B oznacza pole magnetyczne, w który jest wykonywany pomiar prądu krytycznego. B_{irr} określa wartość pola magnetycznego, przy której prąd krytyczny spada do zera **[Q6]**.

Model ten umożliwia analizowanie interakcji sieci wirów z różnymi typami centrów kotwiczenia, w tym: powierzchniowymi centrami kotwiczenia (obszary normalne o dużych rozmiarach), punktowymi centrami kotwiczenia (obszary normalne o długości zbliżonej do długości koherencji), liniowymi centrami kotwiczenia (np. dyslokacje), podstawieniowymi centrami kotwiczenia (zastąpienie B przez C) oraz centrami kotwiczenia tworzącymi się przez wydzielenia wewnątrz

ziarnowe **[Q6]**. Na podstawie analizy gęstości prądu krytycznego w różnych zakresach pola magnetycznego możliwe jest wskazanie, z którymi typami centrów kotwiczenia sieć wirów oddziałuje. Przeprowadzone badania i pomiary wykazały, że wzrost pola magnetycznego prowadzi do zwiększenia siły Lorentza [7, 9, 10]. Słabe centra kotwiczenia lub niska gęstość centrów kotwiczenia powodują ruch sieci wirów, co skutkuje znacznym spadkiem gęstości prądu krytycznego. Uzyskane wyniki pomiarowe dla przewodów NbTi i MgB_2 wykazały, że znaczne zmniejszenie J_c o 70–80% w zakresie zredukowanego pola magnetycznego od 0.3 do 1 T wskazuje na dużą gęstość powierzchniowych centrów kotwiczenia oraz małą gęstość punktowych, liniowych, podstawieniowych i wydzieleniowych centrów kotwiczenia **[Q6]**. Dalsze pomiary wskazały, że zmniejszenie J_c o 7–30%, np. w zakresie od 0.3 do 0.5 T, sugeruje dużą gęstość punktowych centrów kotwiczenia w przewodach MgB_2 i NbTi **[Q6]**. Kolejne wyniki pokazały, że zmniejszenie J_c o 30–50%, np. w zakresie od 0.1 do 0.3 T oraz od 0.3 do 0.5 T, wskazuje na podobną gęstość powierzchniowych i punktowych centrów kotwiczenia w przewodach nadprzewodnikowych **[Q6]**.

Wyniki przedstawione na rys. 8 pokazują analizy przeprowadzone za pomocą zmodyfikowanej metody kotwiczenia sieci wirów, zaproponowanej przez habilitanta **[Q6]**. Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że obróbka termiczna przewodów NbTi prowadzi do znacznego wzrostu J_c w zakresie skalowanego pola magnetycznego od 0 do 0.5 (rys. 8(a)). Jest to wynikiem zwiększenia gęstości powierzchniowych i punktowych centrów kotwiczenia, które silnie przypinają sieć wirów w polach magnetycznych o niskiej i średniej indukcji. Analiza przedstawiona na rys. 8(a) wskazuje także, że punktowe centra kotwiczenia (wydzielenia Ti) umożliwiają kotwiczenie sieci wirów w zakresie, w którym sieć wirów jest przypinana przez liniowe centra kotwiczenia, ale nie pozwalają na kotwiczenie sieci wirów w zakresie działania centrów kotwiczenia tworzonych przez centra podstawieniowe i wydzieleniowe. Wcześniejsze modele analizy przypinania sieci wirów do centrów kotwiczenia nie pozwalały na wykonanie takich analiz [46, 47]. To sugeruje, że zmodyfikowana metoda analizy kotwiczenia sieci wirów będzie niezwykle pomocna w badaniach centrów kotwiczenia działających w polach magnetycznych o wysokiej indukcji, które efektywnie kotwiczą sieć wirów w zakresie zredukowanego pola magnetycznego od 0,5 do 1 T. Przeprowadzone analizy przedstawione na rys. 8(b) dla przewodów nadprzewodnikowych MgB_2 pozwalają określić wpływ domieszki węgla oraz obróbki termicznej pod wysokim ciśnieniem (HIP) na proces tworzenia centrów kotwiczenia i przypinania sieci wirów. Dalsze wyniki na Rys. 8(b) pokazują, że domieszka C tworzy podstawienieowe centra kotwiczenia w temperaturze 20 K, które pozwalają zwiększyć J_c w zakresie skalowanego pola magnetycznego od 0.73 do 1. Kolejne wyniki pomiarowe pokazują, że domieszka C i proces HIP znacząco zwiększają gęstość centrów kotwiczenia, co pozwala na silniejsze kotwiczenie sieci wirów w zakresie skalowanego pola magnetycznego od 0.5 do 1.



Rys. 8. (a) Zależność gęstości prądu krytycznego od skalowanego pola magnetycznego dla przewodów NbTi w 4.2 K, (b) zależność gęstości prądu krytycznego od skalowanego pola magnetycznego dla przewodów MgB_2 w 20 K **[Q6]**.

Ponadto te wyniki pokazują, że domieszka C i proces HIP ma niewielki wpływ na gęstość centrów kotwiczenia przypinających sieć wirów w zakresie skalowanego pola magnetycznego od 0 do 0.5. Może to potwierdzać wcześniejsze obserwacje, które wskazywały, że wyższa gęstość centrów kotwiczenia w polach o wysokiej indukcji nie prowadzi do zwiększenia Jc w polach o niskiej i średniej indukcji.

Przeprowadzone badania przez Çiçek [75,76] wykazały, że zmodyfikowana metoda analizy kotwiczenia sieci wirów na poszczególnych centrach kotwiczenia, zaproponowana przez habilitanta, pozwala bardzo efektywnie analizować proces powstawania centrów kotwiczenia oraz proces przypinania sieci wirów w polach magnetycznych o niskiej, średniej i wysokiej indukcji, nawet w badaniach magnetycznej gęstości prądu krytycznego. **Kolejnym ważnym osiągnięciem habilitanta jest zaproponowanie zmodyfikowanego modelu kotwiczenia sieci wirów, który pozwala lepiej zrozumieć proces oddziaływania sieci wirów z centrami kotwiczenia w materiałach nadprzewodnikowych [Q6].**

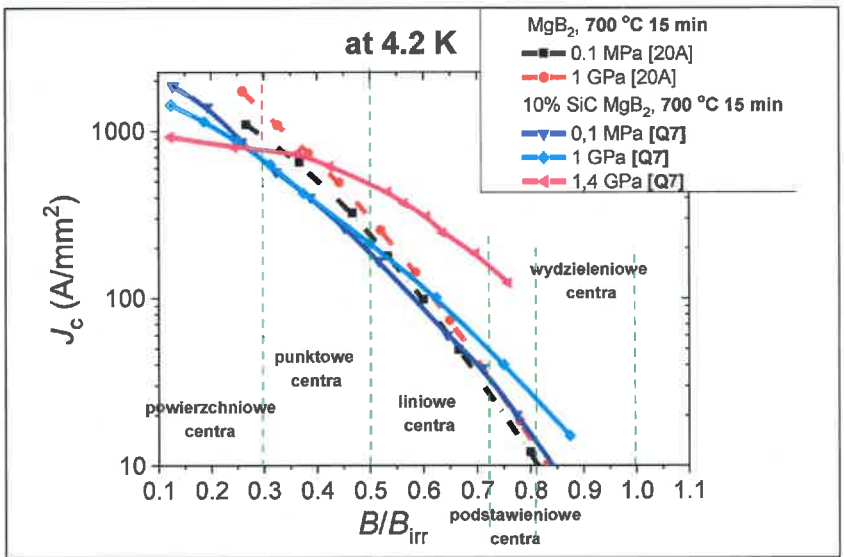
- *Kotwiczenie sieci wirów na liniowych centrach kotwiczenia w ceramicznym materiale nadprzewodnikowym MgB_2 [Q3,Q6,Q7].*

Zrozumienie procesów kotwiczenia sieci wirów na liniowych centrach kotwiczenia w polach magnetycznych o wysokiej indukcji jest kluczowe dla zwiększenia gęstości prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych. Rozwiązanie tego problemu ma ogromne znaczenie dla rozszerzania możliwości zastosowania przewodów nadprzewodnikowych w konstrukcji cewek, które maja generować pola magnetyczne o wysokiej indukcji, np. w reaktorach termojądrowych, silnikach generatorach, zasobnikach energii. Przedstawiona w artykule **[Q6]** zmodyfikowana metoda analizy kotwiczenia sieci wirów na poszczególnych centrach kotwiczenia umożliwiła lepsze zrozumienie procesu kotwiczenia sieci wirów na centrach tworzonych przez dyslokacje, podstawienia oraz wydzielenia wewnątrz ziarnowe. Ponadto ta metoda pozwoliła opracować technologie umożliwiające projektowanie i tworzenie centrów kotwiczenia, które skutecznie przypinają sieć wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji. Badania przeprowadzono dla przewodu nadprzewodnikowych MgB_2, który został wykonany metodą PIT z amorficznego lub krystalicznego nano-boru, z domieszką węglika krzemu (SiC) i węgla (C). Przewody te były wygrzewane w niskim i wysokim ciśnieniu izostatycznym.

Przeprowadzone badania z użyciem zmodyfikowanej analizy kotwiczenia sieci wirów na poszczególnych centrach kotwiczenia wykazały **[Q6]**, że wygrzewanie niedomieszkowanych przewodów MgB_2 pod wysokim ciśnieniem izostatycznym, bez zmniejszenia powierzchni materiału nadprzewodnikowego, tylko nieznacznie poprawia proces kotwiczenia sieci wirów na liniowych, podstawieniowych oraz wydzieleniowych centrach kotwiczenia (Rys. 9). Wyniki uzyskane przy pomocy zmodyfikowanej analizy kotwiczenia sieci wirów dla niedomieszkowanych przewodów MgB_2, zaprezentowane w artykułach **[Q3]** i [46A], pokazują, że wysokie ciśnienie izostatyczne i znaczna redukcja powierzchni materiału nadprzewodnikowego MgB_2 pozwala na wyraźne zwiększenie gęstości liniowych centrów kotwiczenia. Uzyskane wyniki w artykule [46A] wskazują, że duża gęstość liniowych centrów kotwiczenia może efektywnie przypinać sieć wirów w niedomieszkowanych przewodach MgB_2 w temperaturach 20 K i 25 K, ale tylko w przypadku znacznego zmniejszenia powierzchni materiału nadprzewodnikowego MgB_2 **[Q3]**. To sugeruje, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem może znacznie efektywniej tworzyć liniowe centra kotwiczenia w próbkach, w których następuje wzrost gęstości materiału MgB_2. Zwiększenie gęstości materiału MgB_2 prowadzi do znacznej redukcji pustych przestrzeni, poprawy i zwiększenia liczby połączeń międzyziarnowych, a także poprawia jednorodność materiału MgB_2. Większa liczba połączeń międzyziarnowych umożliwia również akumulowanie większej liczby liniowych centrów kotwiczenia. Te efekty pozwalają na ulepszenie kotwiczenia sieci wirów na liniowych centrach kotwiczenia. Badania przeprowadzone przez Serquisa i współpracowników [68] wskazują, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym prowadzi do powstawania dyslokacji, które również pełnią rolę liniowych centrów

kotwiczenia. **Kolejnym ważnym osiągnięciem habilitanta jest wykazanie, że liniowe centra kotwiczenia (dyslokacje krystaliczne) mogą skutecznie przypinać sieć wirów w niedomieszkowanych przewodach MgB_2 o dużej gęstości materiału MgB_2.**

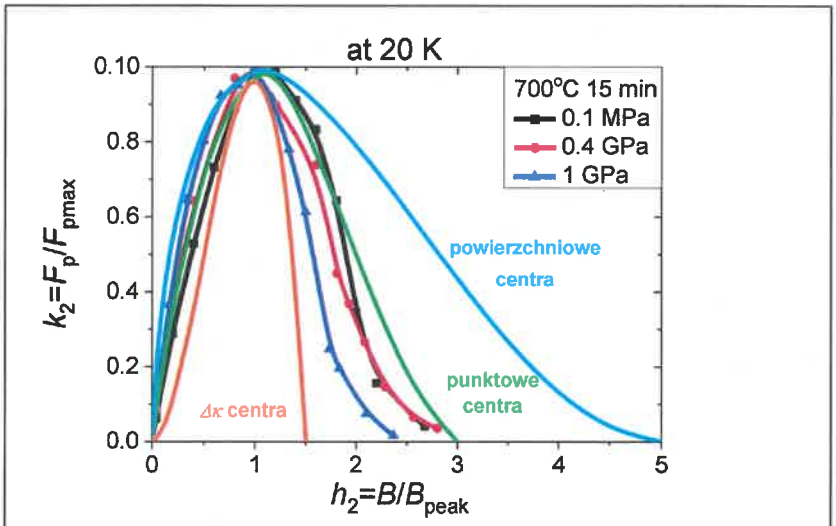
Wykonane badania przy użyciu zmodyfikowanej metody kotwiczenia sieci wirów na poszczególnych centrach kotwiczenia dla domieszkowanych przewodów MgB_2 wykazały, że obróbka termiczna pod niskim ciśnieniem izostatycznym nie prowadzi do poprawy procesu kotwiczenia sieci wirów na liniowych centrach kotwiczenia, ponieważ wartość J_c dla przewodów domieszkowanych i niedomieszkowanych jest zbliżona (Rys. 9) **[Q6,Q7]**. Dalsze badania wskazują, że wygrzewanie w temperaturze 700 °C pod wysokim ciśnieniem izostatycznym 1 GPa dla domieszkowanych SiC przewodów MgB_2 pozwala na ulepszenie kotwiczenia sieci wirów przez liniowe centra kotwiczenia, ponieważ powyżej zredukowanego pola magnetycznego 0.5 T następuje zwiększenie J_c (Rys. 9) **[Q6, Q7]**. Porównując wyniki dla przewodów MgB_2 domieszkowanych i niedomieszkowanych, można zauważyć, że zastosowanie domieszki SiC oraz ciśnienia 1 GPa pozwala zwiększyć wartość $J_c$powyżej zredukowanego pola magnetycznego 0,65. Wskazuje to, że domieszkowanie SiC oraz proces HIP prowadzą do powstawania liniowych i podstawieniowych centrów kotwiczenia. Dalsze wyniki przedstawione na Rys. 9 wykazały, że wygrzewanie domieszkowanych przewodów MgB_2 pod ekstremalnie wysokim ciśnieniem izostatycznym 1,4 GPa pozwala na znaczną poprawę procesu kotwiczenia sieci wirów na punktowych i liniowych centrach kotwiczenia **[Q7]**. Ponadto wyniki pokazują, że ciśnienie izostatyczne 1,4 GPa prowadzi do znacznej redukcji gęstości powierzchniowych centrów kotwiczenia, które przypinają sieć wirów w polach magnetycznych o niskiej indukcji. Obrazy z mikroskopu skaningowego elektronowego **[Q7]** ukazują, że tak wysokie ciśnienie izostatyczne znacząco zwiększa gęstość materiału nadprzewodnikowego MgB_2, redukuje ilość pustych przestrzeni oraz zwiększa liczbę połączeń międzyziarnowych. To pozwala na akumulowanie większej liczby liniowych centrów kotwiczenia w materiale nadprzewodnikowym MgB_2.



Rys. 9. Zależność gęstości prądu krytycznego od skalowanego pola magnetycznego **[Q6]**.

Te wyniki potwierdzają wcześniejsze rezultaty uzyskane dla niedomieszkowanych przewodów MgB_2 w artykułach **[Q3]** i [46A], które wskazywały, że ulepszenie procesu kotwiczenia sieci wirów na liniowych centrach kotwiczenia jest możliwe tylko w przewodach MgB_2 o wysokiej gęstości i jednorodności materiału nadprzewodnikowego. Ponadto wyniki te sugerują, że czynnikiem, który w największym stopniu ogranicza kotwiczenie sieci wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji, są puste przestrzenie oraz niska gęstość materiału MgB_2. Uzyskane wyniki dla przewodów MgB_2 wskazują, że silne kotwiczenie sieci wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji na liniowych centrach

kotwiczenia jest możliwe, ale wymaga to dużej gęstości liniowych centrów kotwiczenia oraz wysokiej gęstości materiału MgB_2, wolnego od pustych przestrzeni. Przeprowadzone badania wykazały, że taki efekt można osiągnąć podczas wygrzewania pod wysokim ciśnieniem izostatycznym. **Istotnym osiągnieciem habilitanta jest pokazanie, że poprawa procesu kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji prowadzi do osłabienia kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o niskiej indukcji (Rys. 9)**. Rezultaty te potwierdzają wcześniejsze wyniki przedstawione w artykule **[Q1]**, które wskazywały, że centra kotwiczenia tworzone przez dyslokacje, podstawienia oraz wytrącenia wewnątrz ziarnowe nie są wystarczające do efektywnego przypinania sieci wirów w polach magnetycznych o niskiej i średniej indukcji.



Rys 10. Zależność przeskalowanej siły kotwiczenia od przeskalowanego pola magnetycznego. F_{pmax} – maksymalna siła kotwiczenia, B_p – pole w którym siła kotwiczenia ma maksymalną wartość **[Q4]**.

Kotwiczenie sieci wirów na wysoko polowych centrach kotwiczenia w temperaturze 20 K w materiale MgB_2 jest jednym z głównych wyzwań dla naukowców zajmujących się nadprzewodnictwem. Zrozumienie tego procesu mogłoby pozwolić na opracowanie tanich i łatwych w produkcji przewodów oraz cewek nadprzewodnikowych. Wyniki uzyskane dla domieszkowanych 10 at% SiC przewodów MgB_2 wykazały, że duża ilość domieszki oraz obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym 1 GPa prowadzi do zmniejszenia gęstości prądu krytycznego w temperaturze 20 K w polach magnetycznych o indukcji powyżej 4 T [48A]. Wskazuje to, że duża ilość domieszki w połączeniu z obróbką termiczną pod wysokim ciśnieniem izostatycznym znacząco zmniejsza gęstość liniowych i podstawieniowych centrów kotwiczenia, co prowadzi do osłabienia kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji w temperaturze 20 K [48A]. Dalsze badania wskazały, że domieszka węgla (C) może tworzyć centra kotwiczenia, które są w stanie przypinać sieć wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji [39A]. Domieszkowanie materiału MgB_2 węglem prowadzi do podstawienia atomów węgla (C) zamiast boru (B). To zjawisko powoduje powstawanie defektów strukturalnych, takich jak naprężenia i odkształcenia, ponieważ atom C jest mniejszy od atomu B. W celu zniwelowania niekorzystnego wpływu domieszki C na temperaturę krytyczną (T_c), przeprowadzono badania dla przewodów MgB_2 domieszkowanych 2 at% C. Wyniki tych badań wykazały, że mała ilość domieszki C i obróbka przy niskim ciśnieniu izostatycznym (0,4 GPa) nie prowadzą do zwiększenia gęstości prądu krytycznego (J_c) w temperaturach 20 i 25 K. To wskazuje, że niska domieszka C oraz niskie ciśnienie izostatyczne bardzo nieznacznie ulepszają kotwiczenie sieci wirów w temperaturze 20 K w polach magnetycznych o wysokiej indukcji. Dalsze badania wykazały, że niska domieszka C oraz obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym (1 GPa)

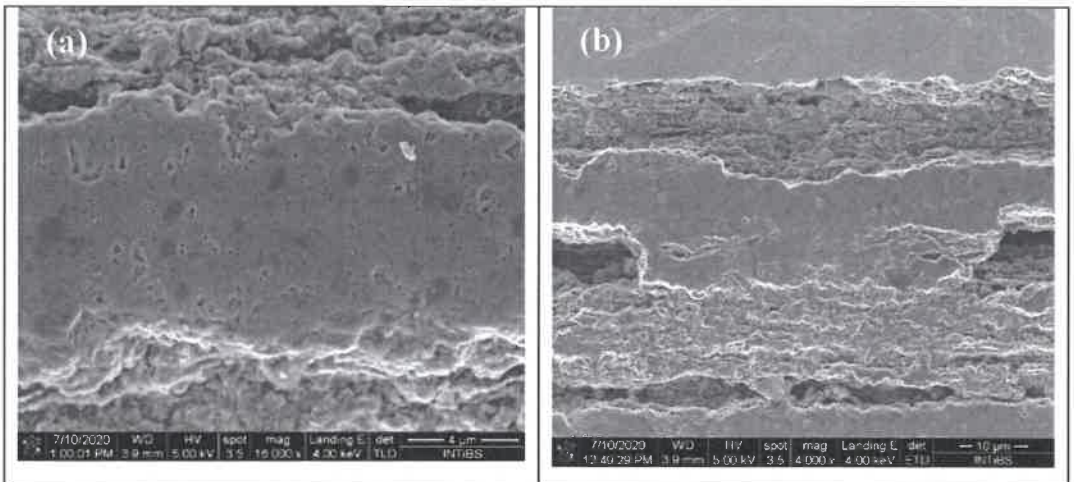
pozwalają zwiększyć J_c i znacząco ulepszyć proces kotwiczenia sieci wirów w temperaturach 20 K i 25 K w polach magnetycznych o wysokiej indukcji. Wskazuje to, że niska ilość domieszki C pozwala uzyskać wysoką gęstość centrów kotwiczenia, takich jak dyslokacje i podstawienia w sieci, ale tylko podczas obróbki termicznej pod wysokim ciśnieniem izostatycznym. Wykonane analizy mechanizmu kotwiczenia sieci wirów przy użyciu metody T. Higuchi [47] (Rys. 10) wykazują, że niska ilość domieszki C oraz obróbka termiczna pod niskim ciśnieniem izostatycznym prowadzą do powstawania głównie punktowych centrów kotwiczenia. Z kolei mała ilość domieszki C i wysokie ciśnienie izostatyczne (1 GPa) pozwalają uzyskać mechanizm kotwiczenia sieci wirów zbliżony do dominującego mechanizmu, który jest tworzony przez dyslokacje i podstawienia w sieci krystalicznej. Na podstawie tych wyników można wskazać, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym może przyspieszać proces podstawiania C za B, co prowadzi do ulepszenia kotwiczenia sieci wirów w temperaturze 20 K w polach magnetycznych o indukcji powyżej 5 T. Porównując wyniki zawarte w artykułach **[Q3]** i **[Q4]**, można stwierdzić, że niewielka ilość domieszki C oraz wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym pozwalają uzyskać zbliżoną wartość J_c w polach magnetycznych o wysokiej indukcji w 20 K do materiału MgB_2 niedomieszkowanego, którego powierzchnia po obróbce termicznej pod wysokim ciśnieniem izostatycznym zmniejszyła się o 30 %. To wskazuje, że zmniejszenie powierzchni domieszkowanego C materiału MgB_2 podczas obróbki termicznej może prowadzić do znacznego zwiększenia ilości centrów kotwiczenia, co może pozwolić znacznie ulepszyć kotwiczenie sieci wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji w 20 K. **Ważnym osiągnięciem habilitanta jest wykazanie, że liniowe centra kotwiczenia mogą znacząco poprawić przypinanie sieci wirów w nadprzewodnikowym materiale MgB_2 w polach magnetycznych o wysokiej indukcji, zarówno w temperaturze 4,2 K, jak i 20 K.**

- *Analiza zjawiska kotwiczenia sieci wirów w przewodach MgB_2 z izotopowym borem ^{11}B **[Q8,Q9]***.

Obecnie bezpieczeństwo energetyczne stanowi kluczowy element wpływający zarówno na życie ludzi, jak i na rozwój gospodarki. Przeprowadzone badania i analizy wskazują, że reaktory termojądrowe mogą umożliwić produkcję taniej i czystej energii. Do prawidłowego oraz opłacalnego działania reaktory termojądrowe wymagają tanich i odpornych na promieniowanie neutronowe cewek nadprzewodnikowych, zdolnych do generowania pola magnetycznego o wysokiej indukcji. Obecnie cewki nadprzewodnikowe wykonuje się z niskotemperaturowych nadprzewodników, takich jak NbTi czy Nb_3Sn. Materiały te mają jednak wiele wad, m.in. konieczność chłodzenia drogim ciekłym helem, degradację gęstości prądu krytycznego pod wpływem napromieniowania szybkimi neutronami, bardzo długi czas zaniku promieniowania (około 10 000 lat) oraz ograniczone zasoby niobu na Ziemi [30A]. Wszystkie te wady znacznie ograniczają możliwość szerokiego zastosowania niskotemperaturowych przewodów nadprzewodnikowych w reaktorach termojądrowych na świecie.

Prowadzone są również badania nad wykorzystaniem wysokotemperaturowych nadprzewodników (HTS) do budowy cewek nadprzewodnikowych w reaktorach termojądrowych. Jednak materiały te mają kilka wad, które ograniczają ich zastosowanie — między innymi bardzo wysoką cenę za jeden metr bieżący taśmy (około 100 USD), ograniczoną długość taśm HTS (do około 300 m), skomplikowaną budowę oraz niską dostępność komponentów. Czynniki te wskazują, że zastosowanie taśm HTS w konstrukcji cewek nadprzewodnikowych przeznaczonych do reaktorów termojądrowych może być bardzo trudne i kosztowne. Powyższe dane pokazują, że konieczne jest opracowanie materiału nadprzewodnikowego o niskiej anizotropii, wysokiej temperaturze krytycznej, odpornego na degradację pod wpływem napromieniowania, o krótkim czasie zaniku promieniowania, niskiej masie oraz tanich komponentach. Przeprowadzone badania wskazują, że wszystkie te wymagania może spełniać materiał nadprzewodnikowy MgB_2 wykonany z wzbogaconego izotopowego boru ^{11}B [30A, 37A]. Przewody $Mg^{11}B_2$ charakteryzują się wysoką temperaturą krytyczną wynoszącą 39,2 K (co umożliwia ich pracę w ciekłym wodorze), niską anizotropią, małą masą, tanimi komponentami (Mg, ^{11}B) oraz bardzo krótkim czasem zaniku promieniowania — około 1 roku [77–81].

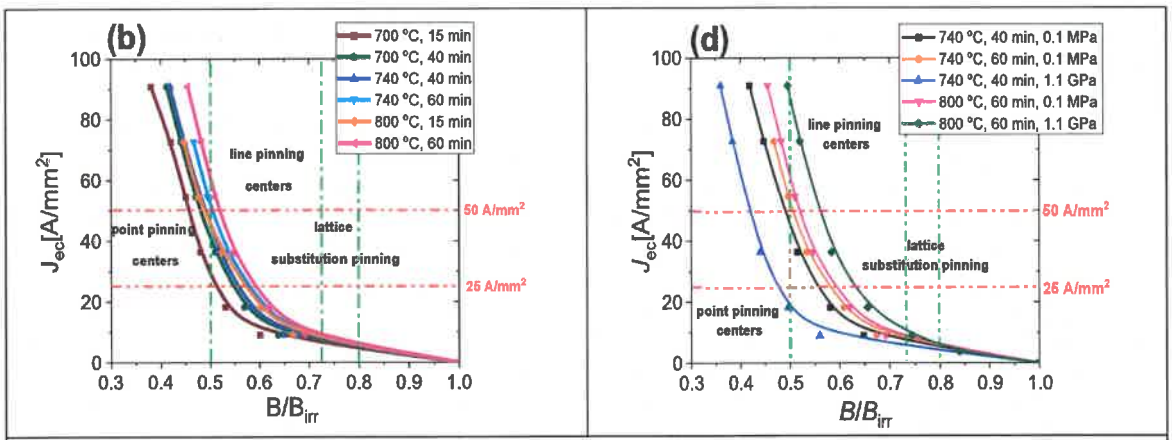
Ponadto promieniowanie nie powoduje degradacji gęstości prądu krytycznego w przewodach $Mg^{11}B_2$. Obecnie jednak przewody $Mg^{11}B_2$ mają stosunkowo niską gęstość prądu krytycznego, wynoszącą około 100 A/mm² w polu 5 T przy temperaturze 4,2 K [82]. Tak niska wartość J_c znacząco ogranicza możliwości zastosowania tych przewodów do budowy cewek nadprzewodnikowych w reaktorach termojądrowych, które wymagają cewek magnetycznych generujących pole o indukcji około 11,5 T. Niska wartość J_c wynika z niepełnego poznania procesów kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji oraz z ograniczonej wiedzy dotyczącej wpływu temperatury wygrzewania na tworzenie się fazy nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$ i centrów kotwiczenia. Przeprowadzone badania wykazały, że formowanie fazy nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$ w przewodach wytwarzanych metodą proszku w rurce (PIT – **Q8**) wymaga znacznie dłuższego czasu i wyższej temperatury wygrzewania niż w przewodach MgB_2 wykonanych z nanoamorficznego naturalnego boru. Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że proces tworzenia fazy nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$ oraz połączeń międzyziarnowych przebiega w sposób odmienny niż w materiale MgB_2. Badania morfologii materiału $Mg^{11}B_2$ wykazały, że kluczową rolę w tych przewodach pełnią gęste warstwy nadprzewodnikowe $Mg^{11}B_2$ (rys. 11) **[Q8]**. Przewody $Mg^{11}B_2$ o zwartej strukturze warstw wykazują wysoką gęstość prądu krytycznego oraz wysokie nieodwracalne pole magnetyczne (B_{irr}). **Uzyskane wyniki wskazały, że gęste warstwy nadprzewodnikowe $Mg^{11}B_2$ umożliwiają powstanie dużej liczby centrów kotwiczenia, które efektywnie unieruchamiają sieć wirów, a także tworzą liczne połączenia międzyziarnowe**. W rezultacie materiał nadprzewodnikowy $Mg^{11}B_2$ charakteryzuje się wysokimi parametrami krytycznymi. Przeprowadzone badania wykazały, że zwiększenie temperatury wygrzewania z 700°C do 800°C oraz wygrzewanie w warunkach niskiego ciśnienia izostatycznego prowadzi do zwiększenia wartości B_{irr} w niskich i średnich temperaturach (10–25 K), lecz nie wpływa na jego poprawę powyżej 25 K **[Q8]**. Oznacza to, że obróbka termiczna w wysokiej temperaturze poprawia proces kotwiczenia sieci wirów jedynie w zakresie niskich i średnich temperatur. Z kolei wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym (1,1 GPa) w temperaturze 800°C pozwala na zwiększenie wartości B_{irr} w szerszym zakresie temperatur, od 10 K do 30 K **[Q8]**.



Rys. 11. (a) i (b) Obrazy SEM - przekrój wzdłużny próbki wygrzewanej w temperaturze 800 °C przez 60 minut pod ciśnieniem atmosferycznym **[Q8]**.

Wynika z tego, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym poprawia proces kotwiczenia sieci wirów nie tylko w niskich i średnich, ale również w wysokich temperaturach. Może to sugerować, że proces HIP prowadzi do powstania dużej gęstości centrów kotwiczenia, skutecznych w szerokim zakresie temperatur. Analiza kotwiczenia sieci wirów została przeprowadzona ulepszoną metodą zaproponowaną przez habilitanta w artykule **[Q6]**. Inżynierska gęstość prądu krytycznego (J_{ec}) na Rys. 12 została wyznaczona dla całej powierzchni przewodu, obejmującej materiał $Mg^{11}B_2$, barierę dyfuzyjną Nb oraz osłonę przewodu nadprzewodnikowego. Analizując wyniki przedstawione na rys.

12(a) w zakresie zredukowanego pola magnetycznego (B/B_{irr}) od 0.4 do 0.5, można zauważyć, że wysoka temperatura wygrzewania znacząco zwiększa wartość J_{ec} **[Q8]**. Wysoka wartość J_{ec} jest wynikiem uzyskania dużej gęstości punktowych centrów kotwiczenia, które skutecznie unieruchamiają sieć wirów w polu magnetycznym o średniej indukcji. Dalsze wyniki przedstawione na rys. 12(a) w zakresie zredukowanego pola magnetycznego od 0,5 do 0,73 pokazują znaczne zmniejszenie wartości J_{ec} oraz osłabienie procesu kotwiczenia sieci wirów na liniowych centrach kotwiczenia, nawet dla próbki wygrzewanej w temperaturze 800°C **[Q8]**. Zmniejszenie J_{ec} o około 80% (w zakresie od 0.5 do 0.73 – Rys.12(a)) wskazuje, że wygrzewanie w wysokiej temperaturze prowadzi do uzyskania niskiej gęstości liniowych centrów kotwiczenia. Na podstawie wyników przedstawionych w artykule **[Q2]** można wnioskować, że wysoka temperatura wygrzewania — jeśli prowadzi do powstania jakichkolwiek liniowych centrów kotwiczenia — to mogą być to dyslokacje ułożone równolegle do zewnętrznego pola magnetycznego. Wyniki uzyskane dla zredukowanego pola magnetycznego powyżej 0,73 wskazują, że temperatura wygrzewania 800°C nie poprawia procesu kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji **[Q8]**. Dalsze wyniki przedstawione na rys. 12(b) pokazują, że wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym (HIP) pozwala znacznie zwiększyć wartość J_{ec} w zakresie zredukowanego pola magnetycznego od 0,3 do 0,5 oraz od 0,5 do 0,73 **[Q8]**. Na podstawie tych wyników można wnioskować, że proces HIP prowadzi do powstania dużej gęstości punktowych centrów kotwiczenia, które poprawiają kotwiczenie sieci wirów w polach magnetycznych o średniej indukcji. Wyniki J_{ec} uzyskane w zakresie zredukowanego pola magnetycznego od 0,5 do 0,73 wskazują, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym zwiększa gęstość liniowych centrów kotwiczenia. Jednak znaczne zmniejszenie J_{ec} o około 75% w tym samym zakresie może sugerować, że proces HIP prowadzi do tworzenia dyslokacji, które w dużej mierze układają się równolegle do zewnętrznego pola magnetycznego **[Q8]**.

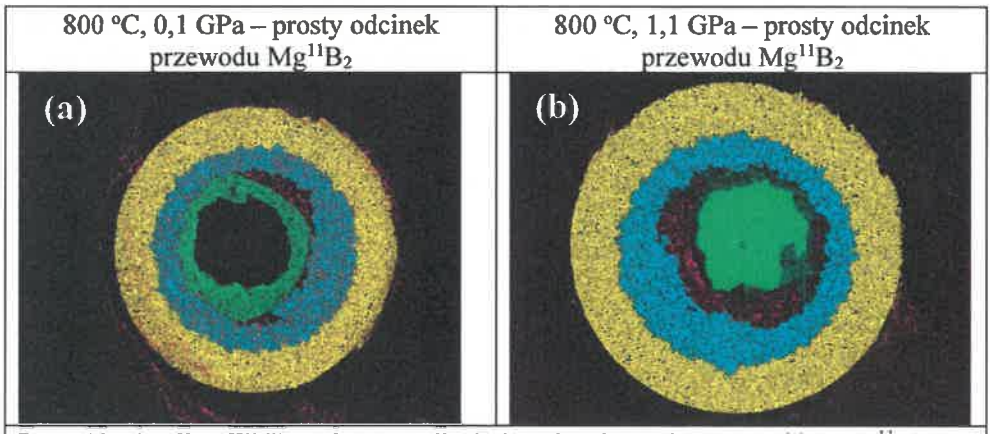


Rys. 12. (a) Zależność inżynierskiej gęstości prądu krytycznego od zredukowanego pola magnetycznego (B/B_{irr}) dla próbka wygrzewanych pod ciśnieniem atmosferycznym i (b) Zależność inżynierskiej gęstości prądu krytycznego od zredukowanego pola magnetycznego (B/B_{irr}) dla próbka wygrzewanych pod ciśnieniem wysokim ciśnieniem izostatycznym – 1,1 GPa **[Q8]**.

Zgodnie z wynikami przedstawionymi w artykule **[Q2]**, dyslokacje ułożone równolegle do zewnętrznego pola magnetycznego istotnie zwiększają J_{ec} w zredukowanym polu magnetycznym 0,5, natomiast jedynie nieznacznie wpływają na wzrost J_{ec} w polu 0,73. Czynnik ten może być przyczyną znacznego spadku wartości J_{ec} w zakresie zredukowanego pola magnetycznego od 0,5 do 0,73 **[Q8]**. Wyniki uzyskane dla próbki wygrzewanej w temperaturze 740°C przez 40 minut pod ciśnieniem izostatycznym 1,1 GPa wskazują, że proces tworzenia i akumulacji centrów kotwiczenia w przewodach $Mg^{11}B_2$ jest silnie zależny od temperatury wygrzewania oraz od struktury gęstej warstwy nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$ **[Q8]**. Ponadto wykonane badania wykazały, że proces HIP umożliwia również zwiększenie wartości J_{ec} w temperaturze 20 K **[Q8]**. Niemniej jednak wartość J_{ec} przewodów $Mg^{11}B_2$ pozostaje wciąż stosunkowo niska i wymaga dalszych badań oraz eksperymentów. Uzyskane

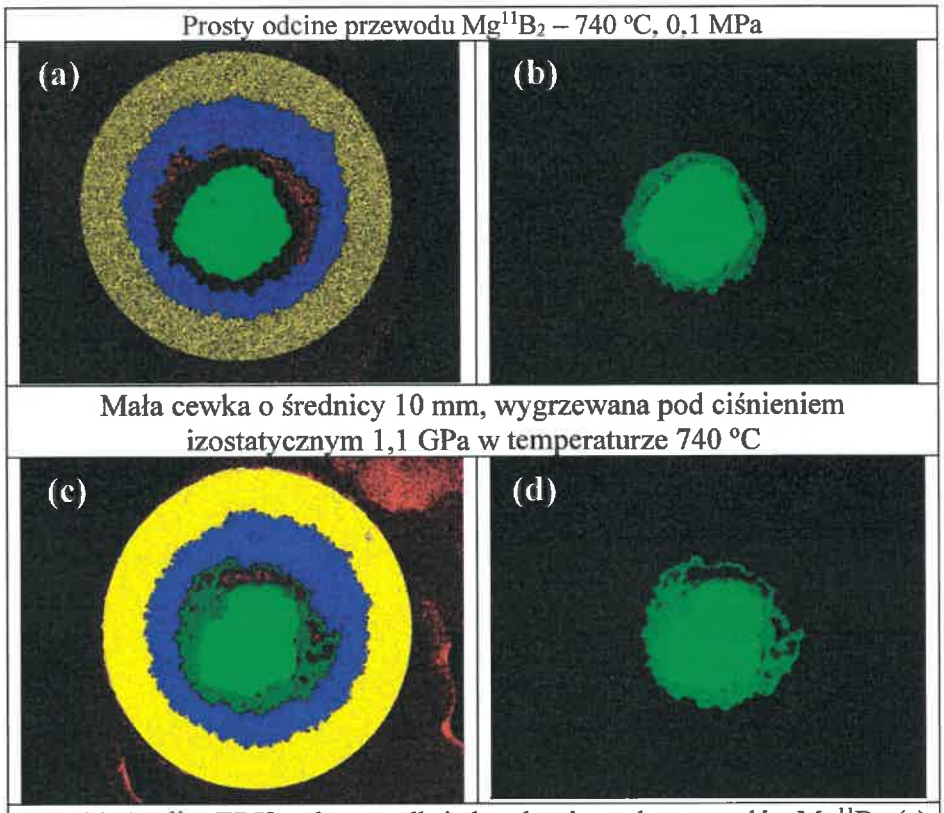
wyniki pokazują, że wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym (1,1 GPa) znacząco poprawia proces kotwiczenia sieci wirów, zwiększa gęstość punktowych centrów kotwiczenia oraz sprzyja tworzeniu liniowych centrów kotwiczenia w przewodach $Mg^{11}B_2$. Otrzymane wyniki analizy kotwiczenia sieci wirów, przeprowadzonej zmodyfikowaną metodą opisaną w **[Q6]**, pozwalają wskazać dalsze kierunki badań, które mogą przyczynić się do znacznego zwiększenia wartości J_{ec} w przewodach $Mg^{11}B_2$. Ulepszenie tych parametrów umożliwi ich szersze zastosowanie przy budowie cewek nadprzewodnikowych w reaktorach termojądrowych. **Najważniejszym osiągnieciem habilitanta jest wskazanie, że liniowe i punktowe centra kotwiczenia przypinają sieć wirów w przewodach nadprzewodnikowych $Mg^{11}B_2$ oraz że gęstość punktowych i liniowych centrów kotwiczenia jest zależna od gęstej warstwy nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$. Dodatkowym istotnym osiągnięciem jest wykazanie, że tworzenie fazy nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$ wymaga znacznie wyższej temperatury wygrzewania niż tworzenie fazy nadprzewodnikowej MgB_2.**

Wykonane badania wykazały, że przewody $Mg^{11}B_2$ wykonane metodą proszku w rurce (PIT) charakteryzują się bardzo niską gęstością materiału nadprzewodnikowego, co prowadzi do znacznego ograniczenia liczby połączeń międzyziarnowych i niskiej gęstości punktowych i liniowych centrów kotwiczenia [**Q8**, 50A]. Otrzymane wyniki pomiarów dla przewodów MgB_2 wykonanych metoda wewnętrznej dyfuzji Mg (IMD) [44A] wskazały, że ta metoda pozwala znacznie zwiększyć gęstości materiału MgB_2 w przewodach, ulepsza proces kotwiczenia sieci wirów, zwiększyć liczbę połączeń międzyziarnowych oraz prowadzi do zwiększenia gęstości prądu krytycznego. Z drugiej strony, badania wykazały, że niedomieszkowane przewody MgB_2 wykonane metodą IMD charakteryzują się niską gęstością prądu krytycznego w polach magnetycznych o wysokiej indukcji [44A]. Wcześniejsze wyniki przedstawione w publikacji **[Q8]** dowodzą, że kotwiczenie sieci wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji można poprawić poprzez wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym (1,1 GPa), które zwiększa gęstość liniowych centrów kotwiczenia (dyslokacji) w materiale nadprzewodnikowym MgB_2 [68]. Z tego powodu przewody $Mg^{11}B_2$ wykonane metoda IMD były wygrzewane pod wysokim ciśnieniem izostatycznym. Ta metoda obróbki cieplnej wprowadza do mikrostruktury materiału $Mg^{11}B_2$ liniowe centra kotwiczenia, takich jak dyslokacje krystaliczne, co umożliwia badanie oddziaływań sieci wirów z liniowymi centrami kotwiczenia [**Q9**, 61A]. Rozszerzenie wiedzy na temat tych oddziaływań pozwoli w przyszłości na dalsze zwiększenie gęstości prądu krytycznego w polach magnetycznych o wysokiej indukcji w przewodach $Mg^{11}B_2$ wykonanych metodą IMD.



Rys. 13. Analiza EDX wykonana dla jednordzeniowych przewodów $Mg^{11}B_2$. (a) próbka wygrzewana w ciśnieniu atmosferycznym w temperaturze 800 °C przez 60 minut i (b) próbka wygrzewana pod ciśnieniem izostatycznym 1,1 GPa w temperaturze 800 °C przez 60 minut [61A]. Kolor zielony oznacza magnez, czerwony oznacza bor, niebieski bariera dyfuzyjna Nb, żółty oznacza monelową osłonę.

Przeprowadzone badania dla jednordzeniowego, niedomieszkowanego przewodu $Mg^{11}B_2$ wykonane metodą wewnętrznej dyfuzji Mg (IMD) wykazały, że wygrzewanie w zakresie temperatur od 700°C do 770°C pod ciśnieniem atmosferycznym pozwala zwiększyć wartość B_{irr} z 2.5 T do 5.5 T w temperaturze 20 K, uzyskać temperaturę krytyczną 35 K oraz znacząco zwiększyć wartość J_c w 20 K [61A]. Dalsze wyniki badań pokazały, że wygrzewanie przewodów $Mg^{11}B_2$, wykonanych metodą IMD, pod wysokim ciśnieniem izostatycznym 1,1 GPa w temperaturach 770°C i 800°C prowadzi do obniżenia temperatury krytycznej (do ok. 33,5 K) oraz znaczącej redukcji zarówno B_{irr}, jak i J_c [61A]. Wyniki te wskazują, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym (1,1 GPa) w temperaturze 770°C i 800°C nie poprawia procesu kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji [61A]. Oznacza to, że proces HIP w przewodach $Mg^{11}B_2$ wykonanych techniką IMD prowadzi do powstania niewielkiej liczby liniowych centrów kotwiczenia, takich jak dyslokacje krystaliczne. Wyniki na Rys. 13 wskazują, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym spowalnia proces dyfuzji Mg do warstwy ^{11}B. Dalsze badania wykazały, że obróbka termiczna w temperaturze 740 °C pod wysokim ciśnieniem izostatycznym 1,1 GPa oraz wygięcie przewodu $Mg^{11}B_2$ na średnicy 10 mm pozwalają znacząco zwiększyć wartości B_{irr} i J_c w temperaturze 20 K w porównaniu z prostym odcinkiem tego przewodu $Mg^{11}B_2$ **[Q9]**.



Rys. 14. Analiza EDX wykonana dla jednordzeniowych przewodów $Mg^{11}B_2$. (a) i (b) prosty odcinek przewodu $Mg^{11}B_2$ wygrzewany w temperaturze 740 °C przez 40 minut pod ciśnieniem atmosferycznym i (b) mała cewka o średnicy 10 mm wygrzewana w temperaturze 740 °C przez 40 minut pod ciśnieniem 1,1 GPa. Kolor zielony oznacza magnez, czerwony oznacza bor, niebieski bariera dyfuzyjna Nb, żółty oznacza monelową osłonę **[Q9]**.

Wskazuje to, że obróbka termiczna prowadzona pod wysokim ciśnieniem izostatycznym poprawia proces kotwiczenia sieci wirów w przewodach $Mg^{11}B_2$. Badania EDS oraz analizy mikrostruktury wykazały, że wygięcie przewodu $Mg^{11}B_2$ prowadzi do obniżenia gęstości warstwy ^{11}B w jego zewnętrznej części. Umożliwia to zwiększenie dyfuzji magnezu do warstwy ^{11}B (Rys. 14), uzyskanie

większej ilości fazy nadprzewodnikowej oraz powstawanie centrów kotwiczenia, które skutecznie unieruchamiają sieć wirów w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji. Zjawisko to prowadzi do znacznego wzrostu wartości J_c w temperaturze 20 K w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji w przewodach $Mg^{11}B_2$. Otrzymane wyniki pozwalają również wyjaśnić przyczynę słabego wpływu procesu HIP na J_c, B_{irr} i dyfuzję magnezu do warstwy boru ^{11}B, obserwowanego we wcześniejszej pracy [61A]. Na podstawie wyników przedstawionych w artykule **[Q9]** dla przewodów $Mg^{11}B_2$ wykonanych metodą IMD można stwierdzić, że wysoka gęstość warstwy ^{11}B całkowicie zatrzymuje ciśnienie izostatyczne generowane przez komorę wysokociśnieniową. Ponadto wysoka gęstość warstwy boru ^{11}B znacząco spowalnia proces dyfuzji magnezu, co z kolei opóźnia tworzenie fazy nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$ oraz utrudnia powstawanie centrów kotwiczenia w warstwie nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$.

Porównując wyniki dla przewodu $Mg^{11}B_2$ wygrzewanego w temperaturze 800 °C przez 60 minut [61A] z przewodem $Mg^{11}B_2$ wygiętym na karkasie o średnicy 10 mm i wygrzewanym w temperaturze 740 °C przez 40 minut pod ciśnieniem izostatycznym 1.1 GPa **[Q9]**, można zauważyć, że obie próbki mają podobne parametry krytyczne. Jednak wyniki przedstawione na Rys. 13(a) i 14(c) pokazują znaczną różnicę między obiema próbkami [**Q9**, 61A]. Próbka wygrzewana w temperaturze 800 °C przez 60 minut (0.1 MPa) posiada całkowicie przereagowany materiał nadprzewodnikowy, co potwierdza pusty otwór po magnezie (Rys. 13(a)) [61A]. Natomiast próbka wygięta na średnicy 10 mm i wygrzewana w temperaturze 740 °C przez 40 minut pod ciśnieniem izostatycznym 1,1 GPa ma znacznie słabiej przereagowany materiał $Mg^{11}B_2$, ponieważ wciąż obecny jest nieprzereagowany rdzeń magnezu (Rys. 14(c) i (d)). Wyniki te wskazują, że przeprowadzenie pełnej reakcji syntezy w próbce $Mg^{11}B_2$ po wygięciu i wygrzewaniu pod ciśnieniem izostatycznym 1,1 GPa (osiągając pusty otwór po Mg, jak na Rys. 13(a)) mogłoby znacząco zwiększyć J_c w 20 K oraz poprawić proces kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji. Przeprowadzone badania wykazały, że wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym 1,1 GPa pozwala ulepszyć proces kotwiczenia sieci wirów, zwiększyć dyfuzję Mg, gęstość centrów kotwiczenia oraz ilość fazy nadprzewodnikowej w przewodach $Mg^{11}B_2$. Jednak kluczowym czynnikiem decydującym o efektywności procesu HIP jest gęstość warstwy ^{11}B w przewodzie. Wysoka gęstość warstwy ^{11}B powoduje, że proces HIP tworzy niska ilość centrów kotwiczenia, które nieznacznie poprawia kotwiczenia sieci wirów, ponieważ ciśnienie izostatyczne generowane przez komorę zatrzymuje się na warstwie boru ^{11}B i nie działa na rdzeń Mg. Natomiast niska gęstość warstwy ^{11}B pozwala uzyskać duża gęstość centrów kotwiczenia, które umożliwią znaczne ulepszenie kotwiczenia sieci wirów w przewodach $Mg^{11}B_2$, ponieważ siła generowana przez ciśnienie izostatyczne może przyspieszać proces dyfuzji Mg do warstwy ^{11}B. Pozwala to uzyskać większą ilość fazy nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$ nawet przy niskiej temperaturze wygrzewania. **Najważniejszym osiągnięciem habilitanta jest pokazani, że proce HIP pozwala uzyskać dużą gęstość centrów kotwiczenia w przewodach $Mg^{11}B_2$ wykonanych technika IMD, które pozwalają silnie przypiąć siec wirów w 20 K.**

4.3.3. Podsumowanie osiągniecia naukowego

Wybrano cykl sześciu obszarów badawczych, które zostały zaprezentowane w rozprawie habilitacyjnej. Wszystkie były skoncentrowane na wskazaniu czynników odpowiedzialnych za kotwiczenie sieci wirów w wybranych materiałach nadprzewodnikowych w stanie mieszanym. Przeprowadzone badania dotyczyły następujących kwestii: wpływu rodzaju centrów kotwiczenia na przypinanie sieci wirów, wpływu domieszek na proces kotwiczenia sieci wirów w temperaturze 20 K, wpływu obróbki termicznej pod wysokim ciśnieniem izostatycznym na przypinanie sieci wirów w temperaturze 20 K oraz wskazania czynników, które pozwalają ulepszyć metodę analizy procesu kotwiczenia sieci wirów.

Główną motywacją pierwszego projektu było opracowanie próbki z odizolowanymi centrami kotwiczenia oraz metody umożliwiającej badanie zachowania sieci wirów w polach magnetycznych o niskiej, średniej i wysokiej indukcji. Uzyskane wyniki pomiarów wykazały, że w materiale

nadprzewodnikowym NbTi występuje pięć różnych rodzajów centrów kotwiczenia, które silnie kotwiczą sieć wirów w polach magnetycznych o różnych indukcjach **[Q1]**. W polach magnetycznych o indukcji od 0 T do 3 T najsilniej sieć wirów kotwiczą centra powierzchniowe. W polach magnetycznych o indukcji od 3 T do 6 T, sieć wirów jest najsilniej przypinana przez centra punktowe (obszary normalne o grubości zbliżonej do długości koherencji). Dalsze pomiary wykazały, że w polach magnetycznych o indukcji od 6 T do 8 T najsilniej sieć wirów kotwiczą centra liniowe, tworzone przez dyslokacje krystaliczne. Kolejne wyniki wskazały, że w polach magnetycznych o indukcji od 8 T do 9,2 T sieć wirów jest kotwiczona przez centra, które wcześniej nie zostały zaobserwowane. W polach magnetycznych o indukcji od 9,2 T do 10 T sieć wirów jest silnie kotwiczona przez centra kotwiczenia tworzone przez wydzielanie Ti wewnątrz ziarnowe. Jednym z najważniejszych osiągnięć tego cyklu jest po raz pierwszy precyzyjne określenie zakresów pól magnetycznych, w których poszczególne centra kotwiczenia najsilniej przypinają sieć wirów w materiale nadprzewodnikowym w stanie mieszanym **[Q1]**. Wyniki te znacznie ułatwiają dobór centrów kotwiczenia, zrozumienie mechanizmów przypinania sieci wirów oraz wskazują metody, które pozwalają znacząco zwiększyć gęstość prądu krytycznego w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji.

Kolejne badania dotyczyły wpływu ustawienia dyslokacji krystalicznych na kotwiczenie sieci wirów w materiale nadprzewodnikowym w stanie mieszanym **[Q2]**. Uzyskane wyniki pokazały, że dyslokacje krystaliczne ustawione prostopadle do zewnętrznego pola magnetycznego najsilniej kotwiczą sieć wirów w polu magnetycznym o indukcji 8 T. Dalsze badania wykazały, że dyslokacje ustawione równolegle do zewnętrznego pola magnetycznego najsilniej kotwiczą sieć wirów w polu magnetycznym o indukcji 6 T. Uzyskane wyniki eksperymentalne pokazują po raz pierwszy wpływ efektu elastyczności na przypinanie sieci wirów. Duża elastyczność sieci wirów prowadzi do silnego kotwiczenia w polach magnetycznych o wysokiej indukcji, co skutkuje wysoką gęstością prądu krytycznego w tych polach. Z kolei niska elastyczność sieci wirów prowadzi do silnego kotwiczenia i wysokiej gęstości prądu krytycznego w polach magnetycznych o średniej indukcji. Jest to kolejne ważne osiągnięcie, które wyjaśnia proces kotwiczenia sieci wirów na liniowych centrach kotwiczenia tworzonych przez dyslokacje krystaliczne.

Motywacją kolejnych badań było lepsze zrozumienie procesu kotwiczenia sieci wirów na punktowych centrach kotwiczenia w temperaturze 20 K w domieszkowanych węglem (C) i tlenkiem samaru przewodach MgB_2 w stanie mieszanym **[Q3, Q4, Q5]**. Otrzymane wyniki pokazały, że różne rodzaje domieszek tworzą różne punktowe centra kotwiczenia. Domieszka C tworzy punktowe centra kotwiczenia, które silnie przypinają sieć wirów poniżej temperatury 20 K. Dalsze pomiary i analizy wskazały, że domieszka C słabo kotwiczy sieć wirów powyżej temperatury 25 K. Uzyskane wyniki sugerują, że może to być wynikiem podstawiania C za B, które prowadzi do obniżenia temperatury krytycznej (T_c) materiału nadprzewodnikowego. Jest to istotny efekt, ponieważ prąd nadprzewodzący wiru musi płynąć w materiale nadprzewodnikowym. Zatem materiał nadprzewodnikowy MgB_2 o niskich parametrach krytycznych na zewnątrz centrum kotwiczenia pogarsza przypinanie sieci wirów, szczególnie powyżej temperatury 25 K. Kolejne badania wykazały, że domieszka Sm_2O_3 pozwala tworzyć punktowe centra kotwiczenia, które efektywnie przypinają sieć wirów w temperaturze powyżej 20 K. Ponadto badania wskazały, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym oraz wysoka gęstość niedomieszkowanego materiału nadprzewodnikowego MgB_2 pozwalają uzyskać dużą gęstość punktowych centrów kotwiczenia, które efektywnie kotwiczą sieć wirów poniżej temperatury 25 K. Kolejnym ważnym osiągnięciem, które zostało uzyskane za pomocą transmisyjnego mikroskopu elektronowego, było wykazanie, że domieszka Sm_2O_3 pozwala uzyskać na zewnątrz domieszki Sm_2O_3 czysty materiał nadprzewodnikowy MgB_2 bez zanieczyszczeń. Jest to istotny efekt, ponieważ prąd nadprzewodzący związany z wirem musi przepływać przez materiał nadprzewodnikowy. W efekcie wysokiej jakości materiał nadprzewodnikowy MgB_2 znajdujący się poza centrum kotwiczenia wzmacnia przypinanie sieci wirów, szczególnie w temperaturach powyżej 20 K.

Ograniczenia obecnych modeli analizy procesu kotwiczenia sieci wirów na centrach kotwiczenia były motywacją do opracowania ulepszonego modelu analizy przypinania sieci wirów. Opracowany model umożliwił dokładne określenie wpływu poszczególnych centrów kotwiczenia na

proces przypinania sieci wirów w polach magnetycznych o niskiej, średniej i wysokiej indukcji **[Q6]**. Zaproponowany model analizy kotwiczenia sieci wirów przez habilitanta został już zastosowany przez inne grupy badawcze na świecie, które potwierdziły jego skuteczność w analizie centrów kotwiczenia [75, 76]. Opracowany model pozwala znacznie lepiej zrozumieć procesy kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji. Jest to kluczowy aspekt, ponieważ lepsze zrozumienie tego procesu prowadzi do zwiększenia gęstości prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych, co z kolei może znacząco rozszerzyć możliwości aplikacyjne tych przewodów w generowaniu wysokich pól magnetycznych. Opracowanie ulepszonego modelu analizy kotwiczenia sieci wirów na centrach kotwiczenia, powiązanego z gęstością prądu krytycznego, stanowi kolejne istotne osiągnięcie przedstawionego cyklu badań naukowych.

Obecnie zwiększenie gęstości prądu krytycznego w polach magnetycznych o wysokiej indukcji jest jednym z głównych obszarów badawczych na całym świecie w kontekście nadprzewodnikowych przewodów. Wynika to z faktu, że obecne zastosowania nadprzewodnikowych przewodów, takie jak nadprzewodnikowe zasobniki energii, wymagają wysokiej wartości J_c w polach magnetycznych o wysokiej indukcji. To właśnie stanowiło motywację do podjęcia badań nad procesem przypinania sieci wirów na centrach kotwiczenia w takich polach magnetycznych. Przeprowadzone badania wykazały, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym pozwala w niedomieszkowanych przewodach MgB_2 uzyskać wysoką gęstość defektów strukturalnych, takich jak dyslokacje krystaliczne, które mogą tworzyć liniowe centra kotwiczenia **[Q3]**. Dalsze badania pokazały, że połączenie obróbki termicznej pod wysokim ciśnieniem izostatycznym z domieszkowaniem SiC i C pozwala uzyskać znacznie wyższą gęstość liniowych centrów kotwiczenia, tworzonych przez dyslokacje krystaliczne **[Q4, Q7]**. Kolejnym ważnym osiągnięciem przeprowadzonych badań jest wskazanie, że wysoka gęstość liniowych centrów kotwiczenia, silne kotwiczenie sieci wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji oraz wysoka gęstość prądu krytycznego w tych polach prowadzi do osłabienia procesu kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o niskiej i średniej indukcji oraz do redukcji J_c w tych polach. Jest to bardzo istotny czynnik przy projektowaniu przewodów nadprzewodnikowych, które mają generować silne pola magnetyczne. Wyniki te wskazują także, że przewody nadprzewodnikowe, zaprojektowane do generowania niskich pól magnetycznych, nie będą w stanie generować silnych pól magnetycznych.

Obecnie ludzkość potrzebuje czystych i stabilnych źródeł energii dla dalszego rozwoju. Prowadzone badania wykazały, że reaktory termojądrowe mogą generować duże ilości stabilnej i czystej energii. Jednak do ich funkcjonowania niezbędne są magnesy nadprzewodnikowe, które potrafią generować wysokie pola magnetyczne bez degradacji gęstości prądu krytycznego wskutek działania promieniowania. Ponadto, bardzo ważnym czynnikiem jest krótki czas zaniku promieniowania w przewodach nadprzewodnikowych. Przeprowadzone badania wskazały, że przewody $Mg^{11}B_2$ mogą spełniać powyższe wymagania. Obecnie jednak te przewody mają niską gęstość prądu krytycznego w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji, co znacznie ogranicza ich możliwości aplikacyjne w reaktorach termojądrowych. Zwiększenie gęstości prądu krytycznego w tych polach magnetycznych wymaga lepszego poznania procesów kotwiczenia sieci wirów na centrach kotwiczenia. Lepsze zrozumienie tego procesu w przewodach $Mg^{11}B_2$ pozwoli znacząco zwiększyć gęstość prądu krytycznego, umożliwiając ich zastosowanie w reaktorach termojądrowych. Otrzymane wyniki pomiarowe pokazały, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem znacznie ulepsza proces kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o średniej i wysokiej indukcji w przewodach $Mg^{11}B_2$ wykonanych technika proszku w rurce [**Q8**, 50A]. Dalsze badania wskazały, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym może poprawić proces kotwiczenia sieci wirów w przewodach $Mg^{11}B_2$ wykonanych techniką wewnętrznej dyfuzji magnezu (IMD), ale tylko w przypadku niskiej gęstości warstwy ^{11}B [**Q9**, 61A]. Ważnym osiągnięciem prezentowanego cyklu badań jest wykazanie, że do tworzenia fazy nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$ konieczna jest wyższa temperatura wygrzewania niż w przypadku fazy MgB_2. Kolejnym istotnym osiągnięciem było pokazanie, że gęstość prądu krytycznego oraz akumulacja centrów kotwiczenia są zależne od gęstości warstw nadprzewodnikowych $Mg^{11}B_2$. Dalsze wyniki wykazały również, że proces wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem

izostatycznym może tworzyć liniowe centra kotwiczenia w przewodach $Mg^{11}B_2$ oraz ulepszyć proces kotwiczenia sieci wirów w tych przewodach.

Za swoje największe osiągniecia naukowe uważam

- **wskazanie zakresów indukcji magnetycznej, w których sieć wirów oddziałuje z poszczególnymi rodzajami centrów kotwiczenia w przewodach NbTi.**
- **Wskazanie że dyslokacje ustawione równolegle do zewnętrznego pola magnetycznego najefektywniej kotwiczą sieć wirów w polu magnetycznym o indukcji 6 T oraz pokazanie, że dyslokacje krystaliczne ustawione prostopadle do zewnętrznego pola magnetycznego najefektywniej kotwiczą sieć wirów w polu magnetycznym o indukcji 8 T w przewodach NbTi.**
- **zaproponowanie zmodyfikowanego modelu kotwiczenia sieci wirów, który pozwala lepiej zrozumieć proces oddziaływania sieci wirów z centrami kotwiczenia w materiałach nadprzewodnikowych NbTi i MgB_2.**
- **wykazanie, że domieszka Sm_2O_3 tworzy punktowe centra kotwiczenia, które skutecznie przypinają sieć wirów w zakresie temperatur od 20 K do 30 K w przewodach MgB_2.**
- **wskazanie właściwości katalitycznych domieszki Sm_2O_3, które umożliwia uzyskanie większej ilości fazy nadprzewodnikowej MgB_2 w przewodach nadprzewodnikowych.**
- **pokazanie że poprawa procesu kotwiczenia sieci wirów w polach magnetycznych o wysokiej indukcji prowadzi do osłabienia tego procesu w polach magnetycznych o niskiej i średniej indukcji w przewodach NbTi i MgB_2.**
- **wskazanie, że liniowe i punktowe centra kotwiczenia przypinają sieć wirów w przewodach nadprzewodnikowych $Mg^{11}B_2$ oraz że gęstość punktowych i liniowych centrów kotwiczenia jest zależna od gęstej warstwy nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$ w przewodach nadprzewodnikowych wykonanych technika proszku w rurce**
- **wykazanie, że tworzenie fazy nadprzewodnikowej $Mg^{11}B_2$ wymaga znacznie wyższej temperatury wygrzewania niż tworzenie fazy nadprzewodnikowej MgB_2.**
- **wskazanie że proces tworzenia centrów kotwiczenia, które przypinają siec wirów w przewodach nadprzewodnikowych IMD $Mg^{11}B_2$ jest zależny od gęstości warstwy ^{11}B przed rekcja syntezy.**

4.3.4. Pozostałe osiągnięcia niewchodzące w skład cyklu publikacji naukowych

Habilitant prowadził także badania uzupełniające, związane z osiągnięciami naukowymi, obejmujące wpływ wygrzewania pod wysokim ciśnieniem izostatycznym na morfologię materiału MgB_2 w przewodach nadprzewodnikowych. Analizowano m.in. wielkość ziaren, obecność pustych przestrzeni, jednorodność materiału oraz wpływ temperatury topnienia Mg na tworzenie fazy nadprzewodnikowej MgB_2 [15A, 27A, 35A]. Badania dotyczące gęstości nieprzereagowanego proszku Mg i B wykazały, że jego wyższa gęstość znacząco spowalnia tworzenie fazy MgB_2 [19A, 51A]. Ponadto wykazano, że większe ziarna boru amorficznego opóźniają proces stworzenia fazy nadprzewodnikowej MgB_2 [28A, 31A]. Analizy dotyczące domieszek węgla wykazały ich korzystny wpływ na gęstość prądu krytycznego oraz pola krytyczne materiału nadprzewodnikowego [40A, 45A, 47A]. Badania przewodów wytwarzanych metodą wewnętrznej dyfuzji Mg (IMD) wykazały, że technika ta pozwala znacząco zwiększyć gęstość materiału, ograniczyć puste przestrzenie, poprawić połączenia międzyziarnowe oraz osiągnąć wysokie parametry krytyczne [44A, 55A, 68A]. Z kolei analiza przewodów wykonanych metodą proszku w rurce wykazała bardziej złożoną morfologię niż dotychczas zakładano [67A]. Obrazy z skaningowego mikroskopu elektronowego ujawnił, że wokół pustych przestrzeni tworzą się ziarna MgB_2 w formie prostopadłościanów, z nadwyżką Mg w ich otoczeniu, podczas gdy w dalszej odległości występują drobne ziarna sferyczne. Wyniki te mają istotne znaczenie praktyczne, ponieważ ziarna prostopadłościenne generują większą liczbę połączeń międzyziarnowych niż drobne ziarna kuliste o niskiej gęstości, co sprzyja akumulacji centrów

kotwiczenia, ulepszeniu procesu kotwiczenia sieci wirów oraz zwiększeniu gęstości prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych. Przeprowadzone badania dla przewodów NbTi wskazały, że wygrzewanie pod wysokim ciśnienie izostatycznym pozwala uzyskać wyższą gęstość punktowych centrów kotwiczenia tworzonych przez wytracenia Ti na granicach ziaren [71A]. Ponadto badania wskazały, że wyższa gęstość dyslokacji przyspiesza tworzenie punktowych centrów kotwiczenia [71A].

4.3.5 Omówienie innych osiągnięć naukowych niezwiązane z tematem osiągnięcia naukowego

- Badania bariery dyfuzyjnej MgB_2 *ex situ* w przewodach MgB_2

Przeprowadzone badania wykazały, że przewody MgB_2 *in situ* wymagają dyfuzyjnych barier w celu uzyskania materiału nadprzewodnikowego o wysokiej czystości, co przekłada się na wysokie parametry krytyczne. Obecnie najczęściej stosowaną barierą jest bariera Nb, jednak jej wysoka cena znacząco zwiększa koszt produkcji przewodów MgB_2 *in situ*, co wskazuje na potrzebę opracowania tańszej alternatywy. W odpowiedzi na to wyzwanie opracowano dyfuzyjną barierę z materiału MgB_2 *ex situ* [1A]. Analizy morfologii i składu materiału, przeprowadzone za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego, wykazały, że bariera MgB_2 *ex situ* umożliwia otrzymanie w przewodach MgB_2 materiału o wysokiej czystości i jednorodności [1A, 2A, 6A, 16A, 53A]. Bariera skutecznie hamuje dyfuzję zanieczyszczeń do rdzenia MgB_2 *in situ*, co potwierdzają także pomiary prądu transportowego i właściwości magnetycznych, wskazujące na wysokie parametry krytyczne przewodów nadprzewodnikowych (T_c, J_c) [16A, 53A]. Uzyskane wyniki potwierdzają, że dyfuzyjna bariera MgB_2 *ex situ* stanowi efektywną i bardziej ekonomiczną alternatywę dla bariery Nb, umożliwiającą produkcję przewodów nadprzewodnikowych MgB_2 *in situ* o wysokiej jakości i wydajności.

- Opracowanie metody wykrywania uszkodzeń w barierze dyfuzyjnej

Szczelność dyfuzyjnej bariery jest kluczowa dla uzyskania materiału nadprzewodnikowego MgB_2 o wysokiej czystości. Uszkodzenie bariery na jednym odcinku długości 1 km przewodu MgB_2 uniemożliwia jego wykorzystanie w konstrukcji cewki nadprzewodnikowej, ponieważ powodują straty energii i generuje ciepło, które obniża gęstość prądu krytycznego. Ponadto takie uszkodzenie wprowadza przypadkową liczbę defektów strukturalnych, które tworzą losowe centra kotwiczenia, znacząco utrudniając badanie gęstości prądu krytycznego w przewodach MgB_2 *in situ*. Przeprowadzone badania wykazały, że skok pola elektrycznego w polu magnetycznym o indukcji 1 T oraz skok oporu w temperaturze 9 K są wskaźnikami uszkodzenia dyfuzyjnej bariery Nb [18A, 21A, 22A, 23A]. Dodatkowo opracowana metoda pozwala wykrywać pęknięcia w barierze dyfuzyjnej MgB_2 *ex situ* [23A]. Uzyskane wyniki wskazują, że metoda wykrywania uszkodzeń w barierach dyfuzyjnych może być skutecznie stosowana zarówno podczas optymalizacji procesów obróbki przewodów MgB_2, jak i przy pomiarach prądu krytycznego.

- Określenie parametrów krytycznych i morfologii materiałów nadprzewodnikowych na bazie żelaza

Badania przeprowadzono na próbkach masywnych nadprzewodnikowych FeSe oraz na przewodach nadprzewodnikowych $Ba(Fe_{0.92}Co_{0.08})_2As_2$. Materiały nadprzewodnikowe na bazie żelaza poddano wygrzewaniu pod wysokim ciśnieniem izostatycznym wynoszącym 1 GPa, a próbki FeSe dodatkowo domieszkowano srebrem (Ag). Wyniki badań wykazały, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym znacząco zwiększa gęstość oraz jednorodność materiałów nadprzewodnikowych na bazie żelaza, sprzyja uzyskaniu większej ilości fazy nadprzewodnikowej FeSe oraz poprawia ich transportowe i magnetyczne parametry krytyczne [26A, 33A, 22B, 23B, 1C]. Dodatkowo wprowadzenie domieszki Ag prowadzi do dalszego wzrostu parametrów krytycznych i sprzyja powstawaniu centrów kotwiczenia [26A, 22B, 1C]. Otrzymane wyniki wskazują, że wygrzewanie pod wysokim ciśnieniem izostatycznym może w przyszłości umożliwić dokładniejsze zrozumienie oddziaływania sieci wirów z defektami

strukturalnymi oraz pozwolić na osiągnięcie wysokich parametrów krytycznych w materiałach nadprzewodnikowych na bazie żelaza, co w znaczący sposób zwiększa ich potencjalne zastosowania.

- Wskazanie wpływu pola magnetycznego na ziarna roślin ogrodniczych

Przeprowadzone badania wykazały, że pole magnetyczne o indukcji 1 T przy czasie ekspozycji 60 minut oraz pole magnetyczne o indukcji 9 T przy czasach ekspozycji 15 i 60 minut prowadziły do istotnego wzrostu suchej masy siewek ogórka o około 49% w porównaniu z siewkami, których nasiona nie były poddane procesowi magnesowania w stałym polu magnetycznym [54A]. Kolejne wyniki badań wskazały, że magnesowanie nasion ogórka w polu magnetycznym o indukcji 200 mT i 1 T przez 15 minut przyczyniło się do istotnego wzrostu suchej masy nadziemnej części siewek oraz zwiększenia wskaźnika wigoru B. Natomiast pole magnetyczne o indukcji 1 T przy czasie ekspozycji 60 minut korzystnie wpływało na długość korzeni oraz ich suchą masę [54A]. Wykazano również, że wydłużenie czasu ekspozycji nasion na pole magnetyczne skutkowało skróceniem części nadziemnej siewek ogórka oraz wpływało na wartości wskaźnika wigoru B. Ponadto badania wykazały, że proces magnesowania nasion wpływa na masę i kształt korzeni siewek [54A]. Na podstawie przeprowadzonych analiz można wnioskować, że wzrost i masa siewek ogórka mogą być zależne od magnesowania cząstek magnetycznych obecnych w nasionach. Uzyskane wyniki są szczególnie istotne z punktu widzenia możliwości zwiększenia plonów w uprawach ogrodniczych i rolniczych oraz pozwalają lepiej zrozumieć wpływ stałego pola magnetycznego na cząstki magnetyczne, np. żelazo, znajdujące się w nasionach roślin uprawnych.

- Określenie wpływu ciśnienia na efekt magnetokaloryczny

Przeprowadzone pomiary wykazały, że zmiana pola magnetycznego może ujawniać wiele interesujących efektów wynikających ze sprzężenia podsieci magnetycznej z polem zewnętrznym. Jednym z takich zjawisk jest efekt magnetokaloryczny, który objawia się absorpcją lub emisją ciepła w odpowiedzi na zmiany zewnętrznego pola magnetycznego. Chłodzenie magnetyczne oparte na tym efekcie stało się atrakcyjną alternatywą dla konwencjonalnych technologii chłodzenia, opierających się na sprężaniu i rozprężaniu gazu. Jest ono nie tylko bardziej wydajne i przyjazne dla środowiska, lecz także może być stosowane w szerokim zakresie temperatur – od ultra-niskich do kilkuset kelwinów. Jednym z obszarów, w których chłodzenie magnetyczne może mieć istotne znaczenie, jest skraplanie wodoru. Wodór, będący jednym z najbardziej obiecujących źródeł czystej energii, wymaga schłodzenia do temperatury około 20 K, aby ułatwić jego przechowywanie i transport. Idealny magnetyczny czynnik chłodniczy powinien zachowywać stabilne właściwości magnetokaloryczne w całym zakresie temperatur pracy chłodziarki. Przeprowadzone badania dotyczyły nowego, trójwarstwowego kompozytowego magnetycznego czynnika chłodniczego, który zapewnia jednorodną odpowiedź magnetokaloryczną w zakresie temperatur do 30 K [63A]. Wybrane początkowe magnetyczne związki międzymetaliczne $HoNi_2$, $DyNi_2$ i $TbNi_2$ o strukturze fazy Lavesa wykazują silne właściwości magnetokaloryczne w zakresie temperatur 13–37 K. Skład kompozytu – 23,56% wag. $HoNi_2$, 18,21% wag. $DyNi_2$ oraz 58,23% wag. $TbNi_2$ – został zoptymalizowany pod kątem zmiany pola magnetycznego o indukcji 2 T i określony przy użyciu podejścia numerycznego [63A]. Badane próbki wytwarzano za pomocą iskrowego spiekania plazmowego (SPS) oraz innowacyjnej syntezy w warunkach wysokiego ciśnienia izostatycznego (HIP). Pomimo nieco niższych wyników w próbce poddanej procesowi HIP, zmiana entropii jest niemal jednolita w zakresie temperatur do 30 K, dzięki zwiększonej dyfuzji atomowej między sąsiednimi związkami, co potwierdzają badania mikroskopowe. Tak jednorodnej odpowiedzi magnetokalorycznej w tym zakresie temperatur nigdy wcześniej nie obserwowano w przypadku czynników chłodniczych warstwowych. Wykorzystując innowacyjną technikę syntezy w warunkach wysokiego ciśnienia izostatycznego, otworzyliśmy drogę do wytwarzania wysokowydajnych magnetycznych materiałów kompozytowych, które mogą znaleźć zastosowanie w kriogenicznych chłodnicach magnetycznych pracujących w szerokim zakresie temperatur, zwiększając ich efektywność i przyczyniając się do rozwoju ekonomicznej, czystej energii wodorowej. [63A].

- Optymalizacja własności cewek nadprzewodnikowych NbTi, MgB_2 i HTS

Wykonano obliczenia analityczne rozkładu pola magnetycznego w cewkach NbTi. Ponadto zaprojektowano i wykonano cewki nadprzewodnikowe NbTi. Celem badań było opracowanie cewek nadprzewodnikowych NbTi o wysokiej jednorodności pola magnetycznego wzdłuż głównej osi cewek. Dodatkowo podjęto próby wykonania klucza nadprzewodnikowego. Uzyskane wyniki wykazały, że dodatkowe zwoje kompensacyjne wewnątrz karkasu pozwalają znacznie zwiększyć jednorodność pola magnetycznego w cylindrycznych cewkach nadprzewodnikowych NbTi [1B, 2B, 3B, 4B, 5B, 6B, 8B]. Zwoje wewnętrzne umożliwiają również zmniejszenie liczby źródeł zasilania, co w znacznym stopniu redukuje straty cieplne. Jest to istotny czynnik, który znacząco wpływa na możliwości aplikacyjne cewek nadprzewodnikowych NbTi.

Ponadto prowadzone były również badania nad taśmami wykonanymi z wysoko temperaturowego materiału nadprzewodnikowego (HTS – BiSrCaCuO) pod kątem możliwości ich zastosowania w budowie i konstrukcji cewek nadprzewodnikowych. Wyniki badań wykazały, że wygięcie taśmy HTS oraz częste zmiany temperatury (np. odgrzewanie taśm do temperatury pokojowej) prowadzą do znacznej redukcji prądu krytycznego oraz powstawania uszkodzeń w taśmie HTS [7B, 11B, 13B]. Uzyskane wyniki wskazują, że materiały nadprzewodnikowe wysokotemperaturowe w postaci taśm nie są odporne na gwałtowne zmiany temperatury (np. quench). Ponadto są bardzo wrażliwe na wygięcia i zgięcia, które mogą prowadzić do degradacji prądu krytycznego (J_c). Wskazuje to, że zastosowanie taśm HTS może napotkać wiele trudności, które wymagają rozwiązania.

Przeprowadzone badania wykazały, że wygrzewanie cewek MgB_2 o małej średnicy nie prowadzi do uszkodzenia morfologii ceramicznego materiału nadprzewodnikowego MgB_2, nie osłabia procesu kotwiczenia sieci wirów na centrach kotwiczenia ani nie obniża gęstości prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych. Jest to bardzo istotny wynik, ponieważ pokazuje, że wykonywanie cewek metodą nawiania nieprzereagowanego przewodu MgB_2 *in situ* na karkasie, a następnie wygrzewanie przewodów MgB_2 *in situ* na karkasie, pozwala na wytwarzanie cewek nadprzewodnikowych MgB_2 o wysokich parametrach krytycznych bez uszkodzeń w mikrostrukturze [14A, 42A, 46A, 57A]. Ponadto przeprowadzono badania nad cewkami nadprzewodnikowymi MgB_2 o dużych rozmiarach, obejmujące procesy technologiczne oraz eksperymentalne [34A, 36A]. Wyniki tych badań potwierdziły, że przewody MgB_2 mogą być skutecznie stosowane w konstrukcji cewek nadprzewodnikowych. Jest to szczególnie istotne dla przyszłych zastosowań cewek MgB_2.

- Analiza własności masywnych próbek MgB_2 – pomiary magnetyczne

Badania nad próbkami masywnymi były prowadzone za pomocą metod magnetycznych, takich jak pętle histerezy. Uzyskane wyniki wykazały, że domieszkowanie węglem oraz tlenkami ziem rzadkich pozwala znacząco zwiększyć magnetyczną gęstość prądu krytycznego i tworzy głównie powierzchniowe centra kotwiczenia [17A, 29A, 56A, 59A, 66A]. Ponadto badania wykazały, że domieszki tlenków ziem rzadkich nie obniżają temperatury krytycznej materiału nadprzewodnikowego MgB_2 [56A]. Dalsze badania wykazały, że obróbka termiczna pod wysokim ciśnieniem izostatycznym znacząco zwiększa gęstość materiału MgB_2 w masywnych próbkach, magnetyczną gęstość prądu krytycznego oraz gęstość centrów kotwiczenia. Ponadto redukuje wielkość ziaren MgB_2, poprawia jednorodność materiału nadprzewodnikowego oraz zwiększa liczbę połączeń międzyziarnowych [29A, 56A, 59A, 66A]. Uzyskane wyniki mają duże znaczenie dla produkcji łożysk magnetycznych, które mogą być stosowane w turbinach wiatrowych. Badania te pozwoliły również lepiej zrozumieć zachowanie zamrożonego strumienia w masywnych próbkach MgB_2 oraz wpływ domieszek na zamrożony strumień magnetyczny..

- Określenie roli współczynnika *n value* w przewodach MgB_2

Współczynnik *n value* opisuje przejście przewodu nadprzewodnikowego ze stanu nadprzewodzącego do stanu oporowego. Ostre przejście wskazuje, że przewód nadprzewodnikowy ma wysoki współczynnik *n value*. Wysoki współczynnik *n value* pozwala wykorzystać wysoką wartość prądu krytycznego podczas zasilania cewki nadprzewodnikowej. Niski współczynnik *n value* znacząco ogranicza natomiast wartość prądu, który może być zastosowany podczas zasilania cewki – na przykład *n value* równe 20 pozwala użyć jedynie 50% wartości prądu krytycznego. Przeprowadzone badania wykazały, że wysokie *n value* można uzyskać w przewodach MgB_2 wykonanych z nano-boru oraz w wyniku wygrzewania pod wysokim ciśnieniem izostatycznym [49A]. Badania pokazały również, że współczynnik *n value* jest najniższy w przewodach MgB_2 o morfologii wyspowej, natomiast osiąga najwyższe wartości w przewodach MgB_2 o morfologii warstwowej [49A].

Pomiary prądu krytycznego przeprowadzono zmodyfikowaną metodą zaproponowaną przez habilitanta [18A], w której stosuje się stałe natężenie prądu przy jednoczesnym wzroście pola magnetycznego. Badania tą metodą wykonano dla przewodów NbTi, przewodów MgB_2 oraz taśm HTS wykazały, że nachylenie krzywych pola elektrycznego (E) względem B/B_c oraz współczynnik *n value* zachowują stałą wartość i nie zmieniają się wraz ze wzrostem pola magnetycznego ani natężenia prądu [64A]. Na tej podstawie można stwierdzić, że współczynnik *n value* ma wartość stałą, niezależną od liczby filamentów, rodzaju boru czy domieszek. Dalsze badania wykazały, że *n value* uzyskane tą metodą [18A] zależy od rodzaju materiału nadprzewodnikowego. Najwyższe wartości *n value* uzyskano dla drutów NbTi, natomiast najniższe dla taśm HTS [64A].

Pomiary prądu krytycznego wykonane standardową metodą (stałe pole magnetyczne i rosnące natężenie prądu) wykazały, że nachylenie krzywych E względem I/I_c oraz współczynnik *n value* znacząco maleją wraz ze wzrostem pola magnetycznego i zależą od wielu czynników, takich jak liczba włókien, domieszki, rodzaj boru, osłona przewodu lub taśmy oraz liczba filamentów [64A].

Wykonane pomiary dla przewodów MgB_2 wskazują, że współczynniki *n value* może być także zależny od rodzaju centrów kotwiczenia. Punktowe centra kotwiczenia mogą istotnie zwiększają *n value* w polach magnetycznych o średniej indukcji [41A]. Natomiast powierzchniowe centra kotwiczenia mogą istotnie zwiększają *n value* w polach magnetycznych o niskiej indukcji [41A].

Otrzymane wyniki pokazują, że współczynnik *n value* znacznie wpływa na wartość prądu, którym można zasilać cewki nadprzewodnikowe. Stała wartość *n value* uzyskana za pomocą zmodyfikowanej metody pomiaru prądu krytycznego [18A] może znacznie ułatwić projektowanie cewek nadprzewodnikowych oraz ich stosowanie.

- Analiza efektu topologicznego w przewodach MgB_2

Badania przeprowadzono dla przewodów MgB_2 wyprodukowanych metodą proszku w rurce (PIT). Wyniki wykazały, że zwiększanie natężenia prądu transportowego w zakresie pól magnetycznych o indukcji od 0 T do B_{c1} prowadzi do pojawienia się napięcia [62A]. Dalszy wzrost natężenia prądu transportowego powyżej B_{c1} powoduje zmniejszenie napięcia, aż do zaniku do wartości niemierzalnych w polu magnetycznym o indukcji 120 mT [62A]. Efekt ten jest spowodowany przepływem prądu transportowego w obszarach normalnych na głębokości penetracji. Obszary te powstają na styku materiału nadprzewodzącego z barierami dyfuzyjnymi Nb i MgB_2 *ex situ*. Mogą one również wynikać ze zmniejszenia powierzchni materiału nadprzewodnikowego MgB_2 podczas reakcji syntezy. Dalsze badania wykazały, że napięcie zanika po przekroczeniu wartości B_{c1}, ponieważ materiał nadprzewodnikowy przechodzi w stan mieszany. W stanie mieszanym prąd transportowy może płynąć w całej objętości materiału nadprzewodnikowego [62A]. Uzyskane wyniki pomiarowe pokazują, jak złożony jest przepływ prądu transportowego w przewodach nadprzewodnikowych w stanie Meissnera. Ponadto wyniki te poszerzają obecną wiedzę na temat zachowania prądu transportowego w materiałach nadprzewodnikowych w obrębie głębokości penetracji. Otrzymane wyniki mogą mieć w przyszłości istotne znaczenie dla nadprzewodnikowych układów elektronicznych pracujących w bardzo niskich polach magnetycznych i przy niskim natężeniu prądu.

Przeprowadzone dalsze badania pokazały, że efekt topologiczny międzyfazowy pojawia się w próbkach z warstwą borku żelaza pomiędzy żelazną osłoną a nadprzewodzącym rdzeniem MgB_2 [69A]. Ponadto badania wskazują, że właściwości efektu topologicznego międzyfazowego zależą od

temperatury wygrzewania, początkowej gęstości wypełnienia oraz pola magnetycznego [69A]. Co więcej, badania wskazują, że rezystancja w próbkach z efektem topologicznym międzyfazowym spada do niemierzalnych wartości w temperaturze powyżej 7,3 K. Dalsze pomiary pokazują również, że efekt topologiczny międzyfazowy zanika w polu magnetycznym powyżej 350 mT w temperaturze 4,2 K [69A]. Obrazy oraz analizy SEM-EDS i XRD wskazują, że właściwości efektu topologicznego międzyfazowego w polu magnetycznym zależą od zawartości Fe i Mg. Przeprowadzone pomiary wskazują również, że przepływ prądu transportowego na głębokości penetracji może generować napięcie, gdy na głębokości penetracji prądu obecne są borki żelaza. Pomiary transportu wskazują, że efekt topologiczny międzyfazowy zaczyna zanikać powyżej pola B_{c1} [69A].

- Charakterystyka złączy nadprzewodnikowych MgB_2

Przeprowadzone zostały badania złączy nadprzewodnikowych MgB_2 wykonanych techniką proszku w rurce (PIT) oraz techniką wewnętrznej infiltracji Mg (IMD) [58A, 60A]. Wykonane złącze MgB_2 technika IMD o niewielkich rozmiarach miały bardzo niski opór około $6{,}44 \times 10^{-16}$ Ω oraz prąd krytyczny 62 A w 20 K [58A]. Wykonane pomiary wskazały, że parametry krytyczne złącza nie ulegają degradacji. Ponadto uzyskane rezultaty morfologii złącza MgB_2 IMD pokazały, że materiał nadprzewodnikowy ma duża gęstość i jednorodność. Dalsze badania morfologii wskazały, że metoda IMD wytwarza gęsty materiał nadprzewodnikowy wokół przewodów MgB_2. To pozwala znacznie zwiększyć parametry krytyczne złączy MgB_2, lepiej poznać proces przypinania sieci wirów na centrach kotwiczenia oraz ich wytrzymałość mechaniczną. Przeprowadzone analizy złączy MgB_2 wykonanych technika proszku w rurce pokazały, że te złączą maja wiele wad np. niska gęstość, duża ilość pustych przestrzeni oraz mała ilość połączeń miedzy ziarnowych [60A]. Obecnie złącza nadprzewodnikowe MgB_2 są bardzo intensywnie badane przez wiele grup badawczych na świecie, ponieważ stanowią one integralna cześć magnesów nadprzewodnikowych. Nadprzewodnikowe złącza pozwalają na gromadzenie bezstratne energii w polu magnetycznym. To jest istotny czynniki w budowie i konstrukcji nadprzewodnikowych zasobników energii.

- Badania nadprzewodników rtęciowych – pomiary magnetyczne

Przeprowadzone prace dotyczyły wytwarzania nadprzewodników wysokotemperaturowych oraz badań ich właściwości magnetycznych i fizykochemicznych. W artykule opisano proces sol–żel, który zastosowano podczas syntezy bezrtęciowego prekursora materiału $Ba_2Ca_2Cu_3O_x$. Ponadto przedstawiono właściwości fizykochemiczne polikrystalicznego materiału nadprzewodnikowego $Hg_{0.8}Pb_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ [25]. Prekursor $Ba_2Ca_2Cu_3O_x$ o pożądanym składzie chemicznym i fazowym uzyskano metodą żelową z użyciem EDTA, a następnie poddano go rozkładowi i kalcynacji w zoptymalizowanych warunkach [25]. Nadprzewodnikowy materiał $Hg_{0.8}Pb_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ o drobnoziarnistej morfologii składał się głównie z fazy (Hg,Pb)-1223, w której kryształy miały kształt płytkowy lub ziaren owalnych, charakteryzujących się wysokimi parametrami krytycznymi, np. T_c=129,2T. Próbki były również syntezowane pod wysokim ciśnieniem izostatycznym. Przeprowadzone pomiary wykazały, że magnetyczna gęstość prądu krytycznego w temperaturze 20 K w polu magnetycznym o indukcji 1 T wynosiła 26 A/mm², natomiast w temperaturze 4 K osiągała wartość 155 A/mm² [25A]. Uzyskane wyniki T_c i J_c wskazują, że wysokotemperaturowe materiały nadprzewodnikowe mogą być obiecujące w przyszłych zastosowaniach.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

5.1 Staż naukowy w Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk w Warszawie – czteromiesięczny w roku 2021

Główne zadania obejmowały prowadzenie badań nad wpływem obróbki termicznej pod wysokim ciśnieniem izostatycznym na parametry krytyczne, siłę kotwiczenia oraz mechanizmy

kotwiczenia sieci wirów w materiale $Mg^{11}B_2$ stosowanym w przewodach nadprzewodnikowych. Dodatkowym Celem stażu było zapoznanie się z zasadami działania unikatowej, światowej klasy aparatury wysokociśnieniowej.
Wyniki badań zostały zaprezentowane w poniższych publikacjach naukowych.

61A. D. Gajda, A. Zaleski, A. Morawski, M. Babij, D. Szymański, M. Rindfleisch, D. Patel, M.S.A. Hossain, *Influence of annealing temperature and isostatic pressure on microstructure and superconducting properties of isotopic $Mg^{11}B_2$ wires fabricated by internal Mg diffusion method*, Journal of Alloys and Compounds 933 (2023) 167660
[Q7] D. Gajda, A.J. Zaleski, M. Babij, D. Szymański, A.J. Morawski, M.A. Rindfleisch, D. Patel, M.S.A. Hossain, *Influence of bending and heat treatment under high isostatic pressure on synthesis reaction and transport critical current density in isotopic IMD $Mg^{11}B_2$ wind and react coils*, Journal of Alloys and Compounds 963 (2023) 171239

5.2 Staż naukowy w Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bułgaria – sześć tygodni w latach 2015 - 2020

W latach 2014–2020 habilitant prowadził badania naukowe nad materiałami nadprzewodnikowymi na bazie żelaza (FeSe) we współpracy z naukowcami z Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, w ramach projektów realizowanych przez Polską Akademię Nauk i Bułgarską Akademię Nauk. Badania koncentrowały się głównie na formowaniu czystej fazy nadprzewodnikowej oraz poprawie parametrów krytycznych materiałów nadprzewodnikowych FeSe i FeSeTe. W tym okresie habilitant corocznie odbywał tygodniowy pobyt w Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w poniższych artykułach naukowych.

26A. G. Gajda, A. Morawski, K. Rogacki, T Cetner, A. J. Zaleski, K. Buchkov, E. Nazarova, N. Balchev, M. S. A. Hossain, R. Diduszko, K. Gruszka, P Przyslupski, Ł. Fajfrowski, D. Gajda, *Ag-doped $FeSe_{0.94}$ polycrystalline samples obtained through hot isostatic pressing with improved grain connectivity*, Superconductor Science and Technology 29 (2016) 095002
23B. K Buchko, M Valkovski, D Gajda, K Nenkov and E Nazarova, *Inter-granular effects at high magnetic fields of cuprate and iron chalcogenide superconducting materials*, Journal of Physics: Conference Series 1186 (2019) 012004

1C. T. Adachi, G. Aeppli ..... **D. Gajda**. *Superstripes 2016 - Book of Abstracts* Science Series No.8, Publisher: Superstripes Press, Rome, Italy, Editor: Antonio Bianconi, ISBN: 978-88-6683-055-9, High-Temperature Superconductors: Occurrence, *Synthesis and Applications, Chapter 8. Superconducting and Multiband Effects in FeSe with Ag Addition*
Editors: Muralidhar Miryala and M. R. Koblischka
Pub. Date: 2018 - 2nd quarter **ISBN:** 978-1-53613-341-7

5.3. Staż naukowy w SuPerconductors, oxides and other INnovative materials and devices (CNR SPIN), Genua, Włochy – trzy tygodnie w latach 2017 – 2019

Badania naukowe były prowadzone w ramach projektów badawczych organizowanych przez Polska i Włoską Akademie Nauk. Głównym celem prowadzonych badań przez habilitanta było zapoznanie się z metodami wykonywania materiałów nadprzewodnikowych za pomocą metody odwróconej wewnętrznej dyfuzji magnezowu (r-AIMI), zapoznanie się z metodami pomiarowymi parametrów krytycznych oraz metodami analizy wyników badawczych. Habilitant każdego roku odbywała tygodniowy staż w instytucie CNR SPIN w Genui. Uzyskanie wyniki badawcze zostały opublikowane w artykule naukowym.

43A. G. Bovone, M. Capra, C. Bernini, F. Loria, T. Cetner, D. Gajda, A. Morawski, A. Ballarino, S.C. Hopkins, M. Tropeano, G. Grasso, M. Putti, C. Ferdeghini, A.S. Siri, M. Vignolo, *Reverse advance internal magnesium diffusion process to produce dense MgB_2 bulks and high J_c wires through high pressure heat treatment*, Superconductor Science and Technology 33 (2020) 125003

5.4. Sataż naukowy w Institute for Solid State and Materials Research Dresden, Drezno, Niemcy – sześć tygodni w latach 2013 do 2016

Głównym celem pobytu habilitanta w Institute for Solid State and Materials Research Dresden, było prowadzenie pomiarów prądu krytyczne w przewodach MgB_2 w temperaturze 20 K oraz analiza mechanizmów kotwiczenia sieci wirów. Ponadto habilitant zapoznał się z zasadą działania układu używanych do pomiaru prądu krytycznego przewodów i taśm nadprzewodnikowych. Habilitant każdego roku przebywał w Institute for Solid State and Materials Research Dresden od tygodnia do dwóch tygodni. Uzyskane wyniki pomiarowe zostały opublikowane w artykułach naukowych.

16A. D. Gajda, A. Morawski, A.J Zaleski, W. Häßler, K. Nenkov, M.A. Rindfleisch, E. Żuchowska, G. Gajda, T. Czujko, T. Cetner, M.S.A. Hossain, *The critical parameters in in-situ MgB_2 wires and tapes with ex-situ MgB_2 barrier after hot isostatic pressure, cold drawing, cold rolling and doping*, Journal of Applied Physics 117 (2015) 173908.
[Q2] D. Gajda, A. Morawski, A.J. Zaleski, W. Häßler, K. Nenkov, M. Małecka, M. A. Rindfleisch, M.S.A. Hossain, M. Tomsic, *Experimental research of high field pinning centers in 2% C doped MgB_2 wires at 20 K and 25 K,* Journal of Applied Physics 120 (2016) 113901
46A. D. Gajda, A.J. Zaleski, A.J. Morawski, W. Haßler, K. Nenkov, M.A. Rindfleisch, Md. S.A. Hossain, *Pinning mechanism and engineering critical current density considerations in the design of MgB_2 superconducting coils*, Physica C: Superconductivity and Applications 570 (2020) 1353606

5.5 Staż w Applied Superconductivity and Cryoscience Group Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge, Wielka Brytania - tygodniowy staż pomiarowy w roku 2016.

Głównym celem pobytu było zapoznanie się z zasadą działania oraz konstrukcja układami pomiaru prądu krytyczne, który pozwala wykonywać badania w temperaturze 20 K. Ponadto były analizowane wcześniejsze wyniki badań uzyskane dla przewodów nadprzewodnikowych MgB_2. Habilitant także zapoznała się z metodami obróbki termicznej przewodów MgB_2.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

6.1 Dydaktyka

Ze względu na charakter mojego zatrudnienia w obu jednostkach, jako adiunkt w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur PAN oraz w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN nie byłem i nie jestem bezpośrednio zaangażowany w proces dydaktyczny. Głównym celem mojej pracy jest prowadzenie pomiarów i badań poświęconych materiałom nadprzewodnikowym.

Dodatkowo aktywnie uczestniczę w przygotowywaniu prac licencjackich, magistrantów oraz doktorskich. Ponadto sprawowałem opiekę naukowa podczas pomiarów prowadzonych przez studentów i doktorantów oraz gości z zagranicznych instytutów badawczych.

6.1.1 Opieka naukowa nad studentami

- Opieka naukowa nad studentką trzeciego roku Uniwersytetu Wrocławskiego, (Wydział Fizyki i Astronomii) Panią Dominiką Majchrzak, która odbyła staż naukowy w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur PAN w latach 2015/2016 i Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN od 01.02 do 01.07.2018
- Opieka naukowa nad studentką trzeciego roku Politechniki Wrocławskiej, (Wydział Mechaniczno – Energetyczny) Panią Zofią Mroczek, która odbyła staż naukowy w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur PAN, 16.05. - 10.06.2016 i Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN od 01.02 do 01.07.2018

6.1.2 Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego

- mgr. Tomasz Cetner, Instytut Wysokich Ciśnień PAN, Warszawa od 2011 do 2014, opieka naukowa podczas w wykonywania badań w Laboratorium Międzynarodowym
- mgr. Mariusz Woźniak, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, Pembroke Street, Cambridge, United Kingdom od 2008 do 2012, opieka naukowa podczas w wykonywania badań w Laboratorium Międzynarodowym
- mgr. Emilia Żuchowska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, od 2014 do 2016, opieka naukowa podczas w wykonywania badań w Laboratorium Międzynarodowym

6.1.3 Jako promotor pracy licencjackiej :

- Pani Dominki Majchrzak
  „Badanie parametrów krytycznych w materiałach nadprzewodnikowych", Uniwersytetu Wrocławskiego, Wydział Fizyki i Astronomii, kierunek: Fizyka doświadczalna, Wrocław, 2016

6.1.4 Jako promotor pracy magisterskiej:

- Pani Dominki Majchrzak
  „The influence of the crystal structure on the dominant pinning mechanism in MgB_2", Uniwersytetu Wrocławskiego, Wydział Fizyki i Astronomii, kierunek: Fizyka doświadczalna, Wrocław, 02.07.2018
- Zofia Mroczek
  "Review of application of superconductor MgB_2", Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wrocław, 17.09.2018

6.1.5 Jako promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej:

Od października 2024 pełnie funkcje promotora pracy doktorskiej wspólnie z Prof. Sanat Tolendiuly u Pani Karakat Bolatzhan, która wykonuje doktorat w Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan

Teamt pracy doktorskiej *"Combustion synthesis and study of the properties of superconducting composites based on cuprates doped micro- and nanoparticles"*

6.1.6 Staże naukowe dla studentów studiów doktoranckich

- **Mgr Katarzyna Machnik**, Laboratorium Mikrobiologii Lekarskiej, Zakład Immunologii Chorób Zakaźnych IITD PAN (30 godzin - 2023)
- **mgr. Jakub Smoliński,** Laboratorium Mikrobiologii Lekarskiej, Zakład Immunologii Chorób Zakaźnych, IITD PAN (30 godzin -2023)
- **mgr. Kaja Bilińska,** Odziała Teorii materii skondensowanej, Instytut Niskich Temperatur i Badań strukturalnych PAN (30 godzin – 2023)

6.2 Osiągnięcia organizacyjne

6.2.1 Projekty

Kierownik projektów

- Finansowane przez Narodowe Centrum Nauki
  Miniatura 7 – od 01.08.2023 do 30.07.2024
  Tworzenia średnio i wysoko polowych oraz wysoko temperaturowych centrów kotwiczenia w przewodach MgB_2 za pomocą domieszkowania tlenkiem samaru (Sm_2O_3) -numer rejestracyjny 2023/07/X/ST5/00335
  W ramach projektu powstała publikacja

Q8. D. Gajda, M. Babij, A. Zaleski, D. Avci, F. Karaboga, H. Yetis, I. Belenli, D. Zasada, D. Szymański, M. Małecka, W. Gil, T. Czujko *„The influence of Sm_2O_3 dopant on structure, morphology and transport critical current density of MgB_2 wires investigated by using the transmission electron microscope"*, Journal of Magnesium and Alloys 12 (2024) 5061-5078

- Kierownik dwóch projektów finansowane przez Polska i Bułgarska Akademie Nauk

  a) *Investigation of transport and mixed state properties of Iron-chalcogenide FeSe system modified by Ag addition/doped*
  b) *Investigation of non-conventional superconductors and magnetic biogenic nanoparticle materials*
  W ramach prowadzonych pomiarów i badań powstały poniższe publikacje naukowe

26A. G. Gajda, A. Morawski, K. Rogacki, T Cetner, A. J. Zaleski, K. Buchkov, E. Nazarova, N. Balchev, M. S. A. Hossain, R. Diduszko, K. Gruszka, P Przyslupski, Ł. Fajfrowski, D. Gajda, *Ag-doped $FeSe_{0.94}$ polycrystalline samples obtained through hot isostatic pressing with improved grain connectivity*, Superconductor Science and Technology 29 (2016) 095002
23B. K Buchko, M Valkovski, D Gajda, K Nenkov and E Nazarova, *Inter-granular effects at high magnetic fields of cuprate and iron chalcogenide superconducting materials*, Journal of Physics: Conference Series 1186 (2019) 012004

1C. T. Adachi, G. Aeppli ..... **D. Gajda** *Superstripes 2016 - Book of Abstracts* Science Series No.8, Publisher: Superstripes Press, Rome, Italy, Editor: Antonio Bianconi, ISBN: 978-88-6683-055-9, High-Temperature Superconductors: Occurrence, *Synthesis and Applications, Chapter 8. Superconducting and Multiband Effects in FeSe with Ag Addition*
Editors: Muralidhar Miryala and M. R. Koblischka
Pub. Date: 2018 - 2nd quarter **ISBN:** 978-1-53613-341-7

Wykonawca projektów

- *„Nowa metoda wytwarzania wysokoprądowych kabli nadprzewodzących MgB_2 o strukturze Cu/ex/in situ MgB_2, z nanomateriałów, z wykorzystaniem technologii SHS, MA oraz HIP, optymalizacja parametrów elektrycznych i wytwarzania pod kątem produkcji" 2010 – 2013.* Polish Ministry of Science and Information, Grant: Technology Project no. N N510 278738

- *„Opracowanie niskotemperaturowych materiałów magnetycznie twardych oraz wysokoprądowych nadprzewodników na bazie Fe dla innowacyjnych technologii"* 2015 – 2017 realizowany w ramach Programu ERA.NET Rus Plus Innovation przez konsorcjum zawartym pomiędzy:

a) Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur PAN, Wrocław, Polska (ML),
b) Instytut Leibniza w Dreźnie, Drezno, Niemcy (IFW),
c) Przedsiębiorstwo: Limited Liability Company "TEKhMA", Moskwa, Rosja (TEKhMA).
No146-MAGNES' financed by the EU 7th FP, grant no 609556.

- *„Effect of densification on innovative MgB_2-based superconducting wires through HIP process – high field pinning centers' 2017 – 2019*
  The Polish Academy of Sciences and National Research Council SPIN – (Italy)

- *„Opracowanie metody otrzymywania kompozytowych czynników chłodniczych na bazie magnetycznych związków międzymetalicznych przy wykorzystaniu izostatycznej syntezy wysokociśnieniowej"*. Projekt Opus był finansowany przez Narodowe Centrum Badań w latach od 2019 do 2023. Numer projektu 2019/33/B/ST5/01853.

- *„Koncepcja osiągnięcia przez środki ogniowe Wojsk Rakietowych i Artylerii zdolności do oddziaływania na cele za pomocą impulsu elektromagnetycznego" 2022 -2025*
  Projekt finansowany przez Ministerstwo Obrony Narodowej : *numer grantu 406/2022/DA/GB2*
  Habilitant pełnił role koordynatora projektu w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN.

6.2.2 Organizacja konferencji naukowych

- **Członek komitetu naukowego ma konferencjach**
  a) International Conference on Sensor, Detector, Materials Science and Technologies - SensDeTech, Bolu (October, 2023), Türkiye
  b) International Conference on Sensor, Detector, Materials Science and Technologies - SensDeTech, Bolu (October, 2025), Türkiye

- Współorganizator sesji naukowej poświęconej materiałowi nadprzewodnikowemu MgB_2 na konferencji - ICSM2025, Ölüdeniz-Fethiye, Turcja, 26.04 - 03.05.2025.

6.2.3 Utworzenie nowych laboratoriów

Konstrukcja układów pomiaru prądu krytycznego

- W ramach pracy doktorskiej została zaprojektowany i wykonany w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur PAN układ pomiaru prądu krytycznego (I_c). Ten układ pomiarowy umożliwiała wykonywanie pomiarów I_c w temperaturze 4.2 K i 77 K w polu magnetycznym od 0 do 14 T. W tym układzie pomiarowym pole magnetyczne było generowane przez magnesy Bittera.
- W roku 2022 została zaprojektowany i wykonany nowy układ pomiaru prądu krytycznego w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN. Ten układ pomiarowy pozwala mierzyć I_c w zakresie temperatur od 10 K do 100 K. W tym układzie pomiarowym pole magnetyczne jest generowane przez magnes nadprzewodnikowy.

6.3 Popularyzacja nauki

- **D. Gajda**
  Wykład pt. *„Zastosowanie materiałów nadprzewodnikowych"*

Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych PAN, Wrocław, (08.10.2016) – Noc Laboratorium – Impreza promująca naukę

- **D. Gajda**
  Wykład pt. *„Badań w silnych polach magnetycznych i niskich temperaturach"*
  (19.08.2021) – Impreza organizowana przez Strefę Kultury Wrocław.

- **D. Gajda**
  „Przewody i taśmy nadprzewodnikowe"
  warsztatach dla licealistów "Fizyka To Mnie Fascynuje" – Uniwersytet Wrocławski (26.03.2025)

- **D. Gajda**
  „Materiały nadprzewodnikowe od strony praktycznej: gęstość prądu krytycznego oraz mechanizmy kotwiczenia wirów"
  Warsztaty letnie dla studentów
  Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN, Wrocław, Polska, 04.07.2025

6.4. Seminaria naukowe w zagranicznych instytucjach naukowych

- **D. Gajda**, A. Morawski, A. Zaleski, K. Nenkov, W. Haßler, M. Tomsic, M. Rindfleisch, S. Hossain, A. Yamamoto
  „Influence of hot isostatic pressure on the critical current density of MgB_2 superconducting wires" Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgarian, 08.09.2014

- **D. Gajda**, A. Morawski, A. Zaleski, K. Nenkov, W. Haßler, M. Tomsic, M. Rindfleisch
  „Hot isostatic pressure process, microstructure and critical parameters of MgB_2 wires and FeSe superconductors bulks"
  Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgarian 17.06.2015

- **D. Gajda**, A. Morawski, A. Zaleski and K. Rogacki
  „Improvement of structure and critical current density by using high hot isostatic pressure of 1.2 GPa in $Ba(Fe_{0.92}Co_{0.08})_2As_2$ superconducting material"
  Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgarian 06.06.2017

- **D. Gajda**, A. Morawski, A.J. Zaleski, T. Cetner, J. Ćwik and K. Rogacki
  „Critical current density in NbTi and MgB_2 wires, FeSe and $Ba(Fe_{0.92}Co_{0.08})_2As_2$ bulks"
  CNR SPIN (SuPerconductors, oxides and other INnovative materials and devices) Institute, Genova, Italy 25.10.2017

- **D. Gajda**, A. Zaleski, A. Morawski, M. A. Rindfleisch, T. Cetner, K. Nenkov, W. Häßler, H.Yetis, M. Akdogan, I. Belenli
  „The influence of high field pinning centers and layered structure on critical current density in MgB_2 wires" CNR SPIN (SuPerconductors, oxides and other INnovative materials and devices) Institute, Genova, Italy 03.10.2018

6.4 Recenzowanie artykułów

Numer	Nazwa czasopisma	Liczba wykonanych recenzji
1	Superconductor Science and Technology	8
2	Journal of Superconductivity and Novel Magnetism	6
3	IEEE Transactions on Applied Superconductivity	4
4	Scientific Reports	2
5	Journal of Alloys and Compounds	12
6	Rare Metals	1
7	ACS Omega	1
8	Journal of Magnetism and Magnetic Materials	2
9	Structural Chemistry	1
10	Materials Today Communications	3
11	Journal of Applied Physics	1
12	Ceramics International	7
13	Ultrasonics Sonochemistry	1
14	Materials Today Physics	1
15	Materials	1
16	Acta Physica Polonica A	2
17	Journal of Alloys and Compounds Communications	2
18	Vacuum	1
19	Case Studies in Chemical and Environmental Engineering	1
20	Superconductivity	3
21	Cryogenics	2
22	Physica B: Condensed Matter	2
23	Physica C: Superconductivity and its applications	2
24	Chinese Journal of Physics	1
25	Journal of Materials Research and Technology	1
26	Nanotechnology	1
27	Physica Scripta	1
28	Journal of Magnesium and Alloys	2

Habilitant wykonał **72** recenzji dla **28** czasopism naukowych.

7. Informacje dodatkowe

- **Nagrody i wyróżnienia**
  a) Konkurs na najlepszą prace magisterską - Stowarzyszenia Elektryków Polskich w Częstochowie (sekcji pomiarowej) - pierwsza nagroda (2005/2006)
  b) Praca doktorska habilitanta otrzymała wyróżnienie od Rady Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2014)

c) W sesji posterowej „Nadprzewodzące przewody MgB_2 o wysokiej gęstości prądu krytycznego do zastosowań w turbinach wiatrowych i wodnych."
D. Gajda, A. Morawski i M. Rindfleisch, wyróżnienie
I Ogólnopolskie Sympozjum Energii Odnawialnej , OZE – Energia przyszłości Lublin, 28 – 29 listopad 2015

d) Wystąpienie Ustne – „Krytyczna gęstość prądu w przewodach MgB_2"
D. Gajda, A. Morawski, M. Rindfleisch. A. Zaleski, T. Cetner, pierwsza nagroda w konkursie dla młodych naukowców
VIII Konferencja Naukowa Postępy Elektrotechnologii – Jamrozowa Polana 23 – 25.09.2015

- Habilitant pełni funkcje kierownika seminarium naukowego w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu (od 01.09.2014 do 30.09.2017).

- Rada Naukowa w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Nikich Temperatur co roku akceptowała projekty badawcze, które były wykonywane w bieżącym roku. Habilitant w latach od 2005 do 2016 kierowałem badaniami które dotyczyły pomiary prądu krytycznego w przewodach, taśmach, pastylkach NbTi, MgB2, HTS

Wskaźniki biometryczne (na dzień 23.02.2026) Open Researcher and Contributor ID (ORCID): **0000-0002-6960-3745**			
	Wg. Scopus	Wg. Web of Science	Wg. Google Scholar
Indeks Hirsha	20	20	22
Liczba publikacji	91	88	100
Liczba cytowań	915	890	1041
Bez autocytowań	-	502	
Liczba publikacji jako pierwszy autor i autor korespondencyjny	42	40	47

8. Bibliografia

[1] A. A. Abrikosov, *Soviet Physics JETP-USSR* 5 1174 (1957).
[2] A. A. Abrikosov, *Postępy Fizyki* 5 199 (2004).
[3] U. Essmann, H. Trauble, *Phys. Lett. A* 24 526 (1967).
[4] A. Szewczyk, A. Wiśniewski, R. Puźniak, H. Szymczak, *Magnetyzm i nadprzewodnictwo*, PWN, Warszawa (2012).
[5] D. Priour Jr., H. Fertig, *Phys. Rev. B* 67, 054504 (2003)
[6] J. Y. Ge, J. Gutierrez, V. N. Gladilin, J. Tempere, J. T. Devreese and V. V. Moshchalkov, *Vortices and Nanostructured Superconductors*, Springer International Publishing AG (2017)
[7] G. Blatter, M. Y. Feigel'man, Y. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, V. M. Vinokur, *Rev. Mod. Phys.* 66 1125 (1994).
[8] R. Willa, A. E. Koshelev, I. A. Sadovskyy, and A. Glatz, *Supercond. Sci. Technol.* 31 014001 (2018).
[9] T. Matsushita, *Flux Pinning in Superconductors*, Springer Berlin Heidelberg New York (2007).
[10] W. K. Kwok, U. Welp, A. Glatz, A.E. Koshelev, K.J. Kihlstrom, and G. W Crabtree, *Rep. Prog. Phys.* 79 116501 (2016).

[11] L. Embon, Y. Anahory, A. Suhov, D. Halbertal, J. Cuppens, A. Yakovenko, A. Uri, Y. Myasoedov, M.L. Rappaport, M.E. Huber, A. Gurevich and E. Zeldov, *Sci. Rep.* 5 7598 (2015).
[12] B. Maiorov, S. A. Baily, H. Zhou, O. Ugurlu, J. A. Kennison, P. C. Dowden, T. G. Holesinger, S. R. Foltyn and L. Civale L, *Nat. Mater.* 8 398-404 (2009).
[13] A. I. Larkin and Yu. N. Ovchinnikov, *J. Low Temp. Phys.* 34 409 (1979).
[14] J. L. MacManus-Driscoll and S. C. Wimbush, *Nature Rev. Mater.* 6, 587 (2021).
[15] T. Puig, J. Gutierrez, and X. Obradors, *Nat. Rev. Phys.* 6, 132 (2024).
[16] S. Hahn, K. Kim, K. Kim, X. Hu, T. Painter, I. Dixon, S. Kim, K. R. Bhattarai, S. Noguchi, J. Jaroszynski, and D. C. Larbalestier, *Nature* 570, 496 (2019).
[17] A. E. Koshelev, A. B. Kolton, *Phys. Rev. B* 84 104528 (2011).
[18] J. D. Livingston, Structure and properties of high-field superconductors; for GE R&D Center Report, see www.bnl.gov/magnets/staff/gupta/Summer1968/0377.pdf (1969-1970).
[19] G. Gajda, A. Morawski, R. Diduszko, T. Cetner, M.S.A. Hossain, K. Gruszka, D. Gajda, P. Przyslupski, *J. Alloys Compd.* 709 473 - 480 (2017).
[20] M. Han, C. Dong, C. Yao, Z. Zhang, Q. Zhang, Y. Gong, H. Huang, D. Gong, D. Wang, X. Zhang, F. Liu, Y. Sun,.Z. Zhu, J. Li, J. Luo, S. Awaji, X. Wang, J. Xie, H. Hosono, Y. Ma, *Adv. Mater.* 37 (38) e13265 (2025).
[21] N. J. Long, *Vortices and Nanostructured Superconductors*, Springer International Publishing AG 2017, ISBN 978-3-319-59355-5
[22] S.R. Ghorbani, X.L. Wang, S.X. Dou, S.I.K. Lee, M.S.A. Hossain, *Phys. Rev. B* 78 184502 (2008).
[23] B.J. Senkowicz, R.J. Mungall, Y. Zhu, J. Jiang, P.M. Voyles, E.E. Hellstrom, D.C. Larbalestier, *Supercond. Sci. Technol.* 21 035009 (2008).
[24] M.A. Susner, M.D. Sumption, M. Bhatia, X. Peng, M.J. Tomsic, M.A. Rindfleisch, E.W. Collings, *Physica C* 456 180–7 (2007).
[25] S.M. Kazakov, R. Puzniak, K. Rogacki, A.V. Mironov, N.D. Zhigadlo, J. Jun, C. Soltmann, G. Batlogg, J. Karpinski, *Phys. Rev. B* 71, 024533 (2025).
[26] Y. Liu, J. Qin, C. Ke, C. Cheng, D. Zhou, Y. Zhang, Y. Zhao, *J. Magn. Magn. Mater.* 551 169174 (2022).
[27] T. Weng, L. Yuan, C. Cheng, C. Ke, Y. Zhao, *Supercond. Sci. Technol.* 38 055006 (2025).
[28] O.V. Chernyi, N.F. Andrievskaya, V.O. Ilicheva, G.E. Storozhilov, G.E. Lee, A.A. Squitieri, *AIP Conf. Proc.* 614, 883–890 (2002).
[29] J.A. Parrell, P.J. Lee, D.C. Larbalestier, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 3, 734–737 (1993).
[30] F.C. Klaassen, *Strong vortex pinning by natural linear defects in thin Yba2Cu3O7−δ films*, Vrije Universiteit, Faculty of Sciences, Division of Physics and Astronomy, isbn 90-9015512-0 (2002), De Boelelaan 1081, HV AMSTERDAM, THE NETHERLANDS
[31] L. Civale, *Supercond. Sci. Technol.* 38 043003 (2025).
[32] C. Chen, Y. Liu, Y. Chen, Y. N. Hu, T. Z. Zhang, D. Li, X. Wang, C. X. Wang, Z. Y.W. Lu, Y. H. Zhang, Q. L. Zhang, X. L. Dong, R. Wang, D. L. Feng, and T. Zhang, *Phys. Rev. X* 14, 041039 (2024)
[33] J. Mannhart, D. Anselmetti, J.G. Bednorz, A. Catana, C. Gerber, K.A. Muller and D.G. Schlom *Z. Phys. B* 86 177-81 (1992).
[34] B. Dam, J. M. Huijbregtse, F. C. Klaassen, R. C. F. van der Geest, G. Doornbos, J. H. Rector, A. M. Testa, S. Freisem, J. C. Martinez, B. Stauble-Pumpin, and R. Griessen, *et al Nature* 399 439-42 (1999).
[35] M. Panek, D. Pattanayak, R. Meier-Hirmer, H. Kupfer, *J. Appl. Phys.* 54 7083 (1983).
[36] T. Matsuhita, and H. Kupfer, *J. Appl. Phys.* 63 5048 (1988).
[37] Yu. N. Ovchinnikov, B. I. Ivlev, *Phys. Rev. B* 43 8024 (1991).
[38] A. Diaz, L. Mechin, P. Berghuis and J.E. Evetts, *Phys. Rev. Lett.* 80 3855 (1998)
[39] H. Yamasaki, K. Ohki, I. Yamaguchi, M. Sohma, W. Kondo, H. Matsui, T. Manabe and T. Kumagai, *Supercond. Sci. Technol.* 23 105004 (2010).
[40] C. P. Herring, *J. Phys. F: Metal Phys.* 6 99 - 107 (1976).

[41] A. Jung, S. I. Schlachter, B. Runtsch, B. Ringsdorf, H. Fillinger, H. Orschulko, A. Drechsler and W. Goldacker, *Supercond. Sci. Technol.* 23 095006 (2010).
[42] O.V. Shcherbakova, A.V. Pan, S. Soltanian, S.X. Dou, D. Wexler, *Supercond. Sci. Technol.* 20, 5-10 (2007).
[43] J. C. McKinnell, *Flux pinning in superconducting Nb-Ti alloys,* PhD Thesis (Materials Science) University of Wisconsin-Madison (1990).
[44] E. J. Kramer, *J. Electron. Mater.* 4 839 (1975).
[45] E. J. Kramer, *J. Appl. Phys.* 44 1360 (1973).
[46] D. Dew-Hughes, *Philos. Mag.* 30 293 (1974).
[47] T. Higuchi, S.I. Yoo, M. Murakami, *Phys. Rev. B* 59 1514 (1999).
[48] P.J. Lee, Abridged Metallurgy of Ductile Alloy Superconductors, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, vol. 24 (1999). http://fs.magnet.fsu.edu/~lee/asc/pdf_papers/589.pdf
[49] I. Pfeiffer, H. Hillmann, *Acta Metall.* 16, 1429–1439 (1968).
[50] O.V. Chernyi, N.F. Andrievskaya, V.O. Ilicheva, G.E. Storozhilov, G.E. Lee, A.A. Squitieri, *AIP Conf. Proc.* 614, 883–890 (2002).
[51] I. Pfeiffer, H. Hillmann, *Acta Metall.* 16, 1429–1439 (1968)
[52] P.J. Lee, D.C. Larbalestier, *Acta Metall.* 35, 2523–2536 (1987).
[53] A. Cremasco, P.N. Andrade, R.J. Contieri, E.S.N. Lopes, C.R.M. Afonso, R. Caram, *Mater. Des.* 32, 2387–2390 (2011).
[54] O.V. Chernyi, G.F. Tikhinskij, G.E. Storozhilov, M.B. Lazareva, Y.D. Starodubov, S.I. Savchenko, L.A. Koraiea, N.F. Andrievskaya, *Supercond. Sci. Technol.* 4, 318–323 (1991).
[55] P.J. Lee, J.C. McKinnell, D.C. Larbalestier, *Adv. Cryog. Eng. Mater.* 36, 287–294 (1990).
[56] C. Meingast, D.C. Larbalestier, *J. Appl. Phys.* 66, 5971–5983 (1989).
[57] L. Cooley, P.J. Lee, D.C. Larbalestier, Processing of Low T_c Conductors, *Handbook of Superconducting Materials* (Institute of Physics Publishing, Bristol) pp. 603–639 (2003)
[58] J.F. Li, P.X. Zhang, X.H. Liu, J.S. Li, Y. Feng, S.J. Du, T.C. Wang,W.T. Liu, G. Grunblatt, C. Verwaerde, G.K. Hoang, *Physica C* 468, 1840–1842 (2008).
[59] L. Cooley, P. D. Jablonski, P.J. Lee, D.C. Larbalestier, *Appl. Phys. Lett.,* 58 2984 (1991)
[60] C. Buzea, T. Yamashita, *Magnesium Diboride in Handbook of Superconducting Materials* (Institute of Physics Publishing, Bristol), pp. 1049–1075 (2003).
[61] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu, *Nature* 410 63 (2001).
[62] K. Vinod, R.G. Abhilash Kumar, U. Syamaprasad, Supercond. Sci. Technol. 20, R1 (2007).
[63] R. Flukiger, H.L. Suo, N. Musolino, C. Beneduce, P. Toulemonde, P. Lezza, Physica C 385, 286–305 (2003).
[64] J.-H. Gao, C. Guo, X. Wang, Y. Zhang, Y. Yao, D. Huang, H. Yu, H. Gu, F. Ding1, and Z. Gan, *Supercond. Sci. Technol.* 38, 075010 (2025).
[65] T. Weng, L. Yuan, C. Cheng, C. Ke, and Y. Zhao, *Supercond. Sci. Technol.* 38, 055006 (2025).
[66] Z.K. Liu, D.G. Schlom, Q. Li, X.X. Xi, *Appl. Phys. Lett.* 78, 3678 (2001).
[67] Y. Liu, Y. Yang, H. Ni, C. Cheng, C. Ke, Y. Zhao, *Phys. Lett. A* 500, 129376 (2024).
[68] A. Serquis, L. Civale, D.L. Hammon, X.Z. Liao, J.Y. Coulter, Y.T. Zhu, M. Jaime, D.E. Peterson, F.M. Mueller, V.F. Nesterenko, Y. Gu, *Appl. Phys. Lett.* 82, 2847 (2003)
[69] B. Birajdar, O. Eibl, J. Appl. Phys. 105, 033903 (2009)
[70] S. Barua, M.S.A. Hossain, Z. Ma, D. Patel, M. Mustapic, M. Somer, S. Acar, I. Kokal, A. Morawski, T. Cetner, D. Gajda, S.X. Dou, *Scr. Mater.* 104, 37–40 (2015)
[71] R.W. Heussner, P.D. Jablonski, P.L. Lee, D.C. Larbalestier, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2, 1705 (1995).
[72] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (New York: Wiley) (1966)
[73] Y. Katsura, J. Shimoyama, A. Yamamoto, S. Horii, K. Kishio, *Physica C* 463-465, 225-228 (2007).
[74] J.-J. Jang, J.-H. Ahn, *Phys. Procedia* 45 (2013) 97 – 100.
[75] Ö. Çiçek, *J. Supercond. Nov. Magn.* 38, 73 (2025).
[76] Ö. Çiçek, K. Yakinci, *Acta Phys. Pol., A* 145, 324-335 (2024).

[77] L. Chkhartishvili, *Trends Inorg. Chem.* 11, 105–167 (2009).
[78] F. Cheng, Y. Liu, Z. Ma, H. Li, M.S.A. Hossain, *J. Alloy. Compd.* 650, 508–513 (2015).
[79] M. Putti, V. Braccini, C. Ferdeghini, F. Gatti, G. Grasso, P. Manfrinetti, D. Marré, A. Palenzona, I. Pallecchi, C. Tarantini, I. Sheikin, H.U. Aebersold, E. Lehmann, *Appl. Phys. Lett.* 86, 112503 (2005).
[80] Q. Cai, Q. Guo, Y. Liu, Z. Ma, H. Li, W. Qiu, D. Patel, H. Jie, J.H. Kim, M. Somer, E. Yanmaz, A. Devred, V. Luzin, A. Fatehmulla, W.A. Farooq, D. Gajda, Y. Bando, Y. Yamauchi, S. Pradhan, M.S.A. Hossain, *Energies* 10, 409 (2017).
[81] W. Qiu, H. Jie, D. Patel, Y. Lu, V. Luzin, A. Devred, M. Somer, M. Shahabuddin, J. H. Kim, Z. Ma, S.X. Dou, M.S.A. Hossain, Sci. Rep. 6, 25498 (2016).
[82] Y. Hishinuma, A. Kikuchi, Y. Shimada, T. Kashiwai, S. Hata, S. Yamada, T. Muroga, A. Sagar, Fusion Eng. Des. 98–99, 1076–1080 (2015).

Daniel Gajda
.....
(podpis wnioskodawcy)

WYKAZ OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH ALBO ARTYSTYCZNYCH

Załącznik 3

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

1. Monografie naukowe, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2a ustawy; lub

Nie dotyczy

2. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy;

Tytuł *„Mechanizmy kotwiczenia sieci wirów na centrach kotwiczenia oraz ich wpływ na gęstość prądu krytycznego w przewodach nadprzewodnikowych w stanie mieszanym"*

[Q1] D. Gajda*, A. Zaleski, A. Morawski, M. S.A. Hossain, *„New types of high field pinning centers and pinning centers for the peak effect"*, SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 30 (2017) 085011.
IF_{2017} = 2,861

[Q2] D. Gajda*, A. Zaleski, *„The influence of the direction of dislocation to the external magnetic field on the critical current density and strong trapping of the vortex lattice in NbTi wires"* JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM 38 (2025) 31.
IF_{2024} = 1,7

[Q3] D. Gajda*, A. Morawski, A.J. Zaleski, T. Cetner, W. Häßler, K. Nenkov, M. Małecka, M.A. Rindfleisch, and M. Tomsic, *„Significant enhancement of the critical current of MgB_2 wires through a reduction of the diameter using HIP method"* SCRIPTA MATERIALIA 143 (2018) 77-80.
IF_{2018} = 4,539

[Q4] D. Gajda*, A. Morawski, A.J. Zaleski, W. Häßler, K. Nenkov, M. Małecka, M. A. Rindfleisch, M.S.A. Hossain, M. Tomsic, *„Experimental research of high field pinning centers in 2% C doped MgB_2 wires at 20 K and 25 K"* JOURNAL OF APPLIED PHYSIC 120 (2016) 113901.
IF_{2016} = 2,068

[Q5] D. Gajda*, M. Babij, A. Zaleski, D. Avci, F. Karaboga, H. Yetis, I. Belenli, D. Zasada, D. Szymański, M. Małecka, W. Gil, T. Czujko, *„The influence of Sm_2O_3 dopant on structure, morphology and transport critical current density of MgB_2 wires investigated by using the transmission electron microscope"* JOURNAL OF MAGNESIUM AND ALLOYS 12 (2024) 5061-5078.
IF_{2024} = 15,8

[Q6] D. Gajda*,*„Analysis method of high-field pinning centers in NbTi wires and MgB_2 wires"* JOURNAL OF LOW TEMPERATURE PHYSICS 194 (2019) 166-182.
IF_{2019} = 1,090

[Q7] D. Gajda*, A. Zaleski, A. Morawski, T. Cetner, C.J. Thong, M.A. Rindfleisch, *„Point pinning centers in SiC doped MgB_2 wires after HIP"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 29 (2016) 85010.
IF_{2016} = 2,878

[Q8] D. Gajda*, A.J. Zaleski, A.J. Morawski, M. Babij, D. Szymański, G. Gajda, M.A. Rindfleisch, M. Shahbazi, M.S.A. Hossain, *„Superior engineering critical current density obtained via hot isostatic pressing of MgB_2 wires manufactured using nano-amorphous isotopic boron"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 871 (2021) 159579.

IF_{2021} = 6,371

[Q9] D. Gajda*, A.J. Zaleski, M. Babij, D. Szymański, A.J. Morawski, M.A. Rindfleisch, D. Patel, M.S.A. Hossain, *„Influence of bending and heat treatment under high isostatic pressure on synthesis reaction and transport critical current density in isotopic IMD $Mg^{11}B_2$ wind and react coils"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 963 (2023) 171239.
IF_{2023} = 5,8

Oświadczenia potwierdzające mój merytoryczny wkład w powstanie powyższych prac zostały przedstawione w Załączniku 5 dla publikacji naukowych **Q1** ,**Q3** ,**Q4** i **Q7**. Ze względu na współpracę z wieloma zagranicznymi naukowcami reprezentującymi różne jednostki naukowe, nie było możliwe zebranie wszystkich podpisów na jednym formularzu dla każdego artykułu. W związku z tym, oświadczenia dotyczące poszczególnych publikacji składają się z kilku stron, z których każda zawiera podpis jednego z współautorów.

Oświadczenia potwierdzające mój merytoryczny wkład w powstanie publikacji **Q2**, **Q5**, **Q6** i **Q7** znajdują się na końcu artykułów naukowych w sekcji - **CRediT authorship contribution statement**.

3. Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2c ustawy

4. Inne, niż wymienione w pkt. I.1-3, osiągnięcia naukowe lub artystyczne

Wykaz opublikowanych artykułów **przed uzyskaniem stopnia doktora:**

Wykaz publikacji naukowych : autorzy (* - autor korespondencyjny), tytuł artykułu, czasopismo, wydania, rok

Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC)

1A. Kario*, A. Morawski, B. Głowcki, T. Łada, R. Diduszko, D. Kolesnikov, A. Zaleski, A. Kondrat, **D. Gajda**, *„Superconducting and microstructural properties of MgB_2/Cu wires obtained by high gas pressure technology"* ACTA PHYSICA POLONICA A 111 (2007) 693 – 703.
IF_{2007}=0,340

2A. D. Gajda*, A.J. Zaleski, A. Morawski, A. Kario, *„Effect of nano-SiC doping on the superconducting critical parameters in MgB_2/Fe wires and tapes"* ACTA PHYSICA POLONICA A 113 (2008) 371-374.
IF_{2008}=0,321

3A. V.A. Beloshenko, N.I. Matrosov, V.V. Chishko*, O.N. Mironova, É.A. Medvedskaya, **D. Gajda,** A.J. Zaleski, V.P. Dyakonov, R. Puźniak, H. Szymczak, *„Influence of combined deformation and heat treatment on the superconducting properties of a niobium-titanium alloy"*, LOW TEMPERATURE PHYSICS 34 (2008) 606-609.
IF_{2008}= 0,78

4A. V.A. Beloshenko, T.E. Konstantinova, N.I. Matrosov, V.Z. Spuskanyuk, V.V. Chishko*, **D. Gajda,** A.J. Zaleski, V.P. Dyakonov, R. Puźniak, H. Szymczak *„Equal-channel multi - angle pressing effect on the properties of NbTi alloy"* JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM 22 (2009) 505-510.

IF_{2009}= 0,831

5A. D. Gajda*, A.J. Zaleski, V.P. Dyakonov, N. Matrosov, H. Szymczak, V. Beloshenko, V. Spuskanyuk, V. Chishko, *„Pinning Force in Superconducting Wires Nb-Ti"* ACTA PHYSICA POLONICA A 118 (2010) 333-334.
IF_{2010}=0,671

6A. D. Gajda*, A. Morawski, A. Zaleski, T. Cetner, *„The Influence of ex Situ MgB_2 barrier and HIP on the I_c anisotropy in double core MgB_2/Cu wires"* ACTA PHYSICA POLONICA A 118 (2010) 1059 – 1061.
IF2010=0,671

7A. V.A. Beloshenko, V.V. Chishko*, N.I. Matrosov, V.P. Dyakonov, R. Szymczak, J. Piętoza, R. Puźniak, H. Szymczak, **D. Gajda**, A. Zaleski, *„Effect of deformation and heat treatment with equal-channel, multiple-angle pressing on the superconducting properties of NbTi alloy"* LOW TEMPERATURE PHYSICS 36 (2010) 1045-1048.
IF_{2010}= 0,625

8A. V.A. Beloshenko, N.I. Matrosov, V. Yu Dmitrenko, V.V. Chishko, V.P. Dyakonov*, R. Szymczak, **D. Gajda**, J. Piętoza, S. Piechota, *„Influence of equal-channel multi-angle pressing on mechanical and transport properties of a multi-fibrous NbTi superconductor"* HIGH PRESSURE RESEARCH 31 (2011) 106-109.
IF_{2011}= 0,778

9A. K. Adamczyk*, A. Morawski, T. Cetner, A. Zaleski, **D. Gajda**, M. Rindfleisch, M. Tomsic, R. Diduszko, A. Presz, *„Superconducting properties comparison of SiC doped multifilamentary MgB_2 wires of various sheaths (Cu, Monel, Glidcop) after high pressure HIP treatment"* IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 22 (2012) 6200204-6200204.
IF_{2012}= 1,199

10A. M. Woźniak*, S.C. Hopkins, **D. Gajda**, B.A. Glowacki, *„The effect of copper additions in the synthesis of in situ MgB_2 Cu-sheathed wires"* PHYSICA C: SUPERCONDUCTIVITY 477 (2012) 66-73.
IF_{2012}= 0,718

11A. V.V. Bazarov*, J. Ćwik, **D. Gajda**, P.N. Togulev, N.M. Lyadov, V.A. Shustov, N.M. Suleimanov, *„Pinning properties of cold-processed MgB_2 composite superconducting tapes"* JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM 25 (2012) 1689-1694.
IF_{2012}= 0,702

12A. T. Cetner*, A. Morawski, K. Adamczyk, M. Rindfleisch, M. Tomsic, A. Zaleski, **D. Gajda,** A. Presz, *„Improvement of critical properties of undoped, multifilamentary MgB_2 wires in Nb/Cu after annealing under high gas pressure"* HIGH PRESSURE RESEARCH 32 (2012) 419-424.
IF_{2012}= 0,901

13A. M. Woźniak*, K.L. Juda, S.C. Hopkins, **D. Gajda**, B.A. Glowacki, *„Optimization of the copper addition to the core of in situ Cu-sheathed MgB_2 wires"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 26 (2013) 105008
IF_{2013} = 2,796

14A. D. Gajda*, A. Morawski, A. Zaleski, T. Cetner, M. Małecka, A. Presz, M. Rindfleisch, M. Tomsic, C.J. Thong, P. Surdacki, *„Comparison of critical current density in SiC-doped in situ MgB_2 coils and straight wire samples processed by HIP"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 26 (2013) 115002
IF_{2013} = 2.796

Wykaz opublikowanych artykułów **po uzyskaniu stopnia doktora** - publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC).

15A. T. Cetner*, A. Morawski, **D. Gajda**, W. Häßler, M. Rindfleisch, M. Tomsic, A. Zaleski, T. Czujko, E. Żuchowska, P. Przysłupski, *„Hot isostatic pressing of multifilamentary MgB_2 wires in solid state media for large scale application"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 28 (2015) 045009.
IF_{2015} = 2,717

16A. D. Gajda*, A. Morawski, A.J Zaleski, W. Häßler, K. Nenkov, M.A. Rindfleisch, E. Żuchowska, G. Gajda, T. Czujko, T. Cetner, M.S.A. Hossain, *„The critical parameters in in-situ MgB_2 wires and tapes with ex-situ MgB_2 barrier after hot isostatic pressure, cold drawing, cold rolling and doping"* JOURNAL OF APPLIED PHYSIC 117 (2015) 173908.
IF_{2015} = 2,101

17A. S. Barua, M.S.A. Hossain*, Z. Ma*, D. Patel, M. Mustapic, M. Somer, S. Acar, I. Kokal, A. Morawski, T. Cetner, **D. Gajda**, S.X. Dou, *„Superior critical current density obtained in MgB_2 bulks through low-cost carbon-encapsulated boron powder"* SCRIPTA MATERIALIA 104 (2015) 37-40.
IF_{2015} = 3,305

18A. D. Gajda*, A.J. Zaleski, A. Morawski, M. Rindfleisch, C. Thong, M. Tomsic, *„The electric field jump—detection of damaged Nb barrier in MgB_2 wires annealed under pressure"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 28 (2015) 115003.
IF_{2015} = 2,717

19A. M. Akdogan*, H. Yetis, **D. Gajda**, F. Karaboga, A.T. Ülgen, E. Demirtürk, Ibrahim Belenli, *„Effect of the initial filling density on the critical current of in-situ Fe/MgB_2 wires"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 649 (2015) 1007-1010.
IF_{2015} = 3.014

20A. D. Gajda*, A. Morawski, A. Zaleski, M. Kurnatowska, T. Cetner, G. Gajda, A. Presz, M. Rindfleisch, M. Tomsic, *„The influence of HIP on the homogeneity, J_c, B_{irr}, T_c and F_p in MgB_2 wires"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 28 (2015) 015002.
IF_{2015} = 2,717

21A. D. Gajda*, A. Morawski, A. Zaleski, M.S.A. Hossain, M. Rindfleisch, T. Cetner, *„Experimental research on electric field jump in low magnetic fields: Detection of damage in new ex-situ MgB_2 barriers in MgB_2 wires"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 647 (2015) 303-309.
IF_{2015} = 3,014

22A. D. Gajda*, A. Morawski, A.J. Zaleski, M.A. Rindfleisch, C. Thong, M. Tomsic, M.S. Hossain, T. Cetner, *„The new resistance jump: The detection of damage in Nb barrier in MgB_2 wires"* MATERIALS LETTERS 160 (2015) 81-84.

IF_{2015} = 2,437

23A. D. Gajda*, A. Morawski, A. Zaleski, A. Yamamoto, T. Cetner, *„A defect detection method for MgB_2 superconducting and iron-based $Ba(Fe, Co)_2As_2$ wires"* APPLIED PHYSICS LETTERS 108 (2016) 152601.
IF_{2016} = 3,411

24A. D. Gajda, A. Morawski, A.J. Zaleski, M. Akdoğan, H. Yetiş, F. Karaboğa, T. Cetner, I. Belenli, *„ The influence of HIP process on critical parameters of MgB_2/Fe wires with big boron grains and without barriers"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 687 (2016) 616-622
IF_{2016} = 3,133

25A. T. Brylewski*, K. Przybylski, A. Morawski, **D. Gajda**, T. Cetner, J. Chmist, *„Soft-chemistry synthesis of $Ba_2Ca_2Cu_3O_x$ precursor and characterization of high-T_c $Hg_{0.8}Pb_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O8+\delta$ superconductor"* JOURNAL OF ADVANCED CERAMICS 5 (2016) 185-196
IF_{2016} = 1,198

26A. G. Gajda*, A. Morawski, K. Rogacki, T Cetner, A. J. Zaleski, K. Buchkov, E. Nazarova, N. Balchev, M. S. A. Hossain, R. Diduszko, K. Gruszka, P Przyslupski, Ł. Fajfrowski, **D. Gajda**, *„Ag-doped $FeSe_{0.94}$ polycrystalline samples obtained through hot isostatic pressing with improved grain connectivity"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 29 (2016) 095002
IF_{2016} = 2,878

27A. H. Jie, W. Qiu, M. Billah, M. Mustapic, D. Patel, Z. Ma*, **D. Gajda,** A. Morawski, T. Cetner, M. Shahabuddin, E. Yanmaz, M. Rindfleisch, J.H. Kim, M.S.A. Hossain, *„Superior transport J_c obtained in in-situ MgB_2 wires by tailoring the starting materials and using a combined cold high pressure densification and hot isostatic pressure treatment"* SCRIPTA MATERIALIA 129 (2017) 79-83.
IF_{2017} = 4,163

28A. M. Akdogan*, H. Yetis, **D. Gajda**, F. Karaboğa, A. Morawski, K. Rogacki, I. Belenli, *„Use of amorphous boron and amorphous nano boron powder mixture in fabrication of long in-situ MgB_2/Fe wires"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 702 (2017) 399-403
IF_{2017} = 3,779

29A. G. Gajda, A*. Morawski, R. Diduszko, T. Cetner, M.S.A. Hossain, K. Gruszka, **D. Gajda,** P. Przyslupski, *„Role of double doping with C and RE_2O_3 oxides on the critical temperature and critical current of MgB_2 phase"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 709 (2017) 473-480.
IF_{2017} = 3,779

30A. Q. Cai, Q. Guo, Y. Liu, Z. Ma, H. Li*, W. Qiu, D. Patel, H. Jie, J.H. Kim, M. Somer, E. Yanmaz, A. Devred, V. Luzin, A. Fatehmulla, W.A. Farooq, **D. Gajda**, Y. Bando, Y. Yamauchi, S. Pradhan, M.S.A. Hossain*, *„Doping-Induced Isotopic $Mg^{11}B_2$ Bulk Superconductor for Fusion Application"* ENERGIES 10 (2017) 409.
IF_{2017} = 2,676

31A. D. Gajda*, A. Morawski, A. J. Zaleski, M. Akdoğan, H. Yetiş, F. Karaboğa, T. Cetner, İ. Belenli, *„Formation of high-field pinning centers in superconducting MgB_2 wires by using high hot isostatic pressure process"* JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM 30 (2017) 3397-3402.
IF_{2017}= 1,142

32A. F. Karaboğa*, D. Avcı, H. Yetiş, M. Akdoğan, **D. Gajda**, İ. Belenli, *„Improvement of in-situ Fe/MgB_2 monofilamentary wires by internal Mg-coating process"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 727 (2017) 20-26.
IF_{2017} = 3,779

33A. D. Gajda*, A. Morawski, A. Zaleski, M. Małecka, T. Cetner, K. Rogacki, *„Enhancement of pinning centers density and structure by using hot isostatic pressure of 1.2 GPa in $Ba(Fe_{0.92},Co_{0.08})_2As_2$ superconducting material"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 726 (2017) 1220-1225.
IF_{2017} = 3,779

34A. F. Karaboğa*, H. Yetiş, M. Akdoğan, **D. Gajda**, İ. Belenli, *„Design, fabrication and testing of MgB_2/Fe racetrack coils"* IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 28 (2018) 6200805.
IF_{2018}= 1,288

35A. A. Morawski*, T. Cetner, **D. Gajda**, A.J. Zaleski, W. Haessler, K. Nenkov, M.A. Rindfleisch, M.J. Tomsic and P. Przyslupski, *„MgB_2 wire diameter reduction by HIP – a route for enhanced critical current density"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 31 (2018) 075008.
IF_{2018} = 2,861

36A. D. Patel, W. Qiu, M. Mustapic, J.C. Knott, Z. Ma, **D. Gajda**, M. Shahabuddin, J. Xu, S. Choi, M.J. Tomsic, S. Dou, Y. Yamauchi*, J.H. Kim*, M.S.A. Hossain* *„Evaluation of a solid nitrogen impregnated MgB_2 racetrack coil"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 31 (2018) 105010.
IF_{2018} = 2,861

37A. H. Jie, W. Qiu, **D. Gajda**, J. Kim, V. A. Anvar, A. Nijhuis, Y. Bando, Y. Yamauchi*, V. Luzin* and Md. S. A, Hossain*, *„Evaluation of residual stress and texture in isotope based $Mg^{II}B_2$ superconductor using neutron diffraction"* RSC ADVANCES – ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY 8 (2018) 39455–39462.
IF_{2018}= 2,936

38A. Z. Mroczek*, A. Morawski, T. Czujko, F. Karaboğa, M. Akdoğan, A.J. Zaleski, M. Małecka, T. Cetner, H. Yetiş, **D. Gajda**, I. Belenli, *„Influence of the lamella structure and high isostatic pressure on the critical current density in in situ MgB_2 wires without a barrier"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 776 (2019) 636-645.
IF_{2019} = 3,779

39A. D. Majchrzak*, A. Zaleski, A. Morawski, M. Małecka, M. Rindfleisch, **D. Gajda**, *„The impact of high pressure, doping and the size of crystalline boron grains on creation of high-field pinning centers in in situ MgB_2 wires"* JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM 32 (2019) 845-853.
IF_{2019}= 1,244

40A. D. Majchrzak*, A. Zaleski, A. Morawski, M. Małecka, M. Rindfleisch, **D. Gajda**, *„The Influence of high isostatic pressure on critical current density in C-doped MgB_2 wires"* JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM 32 (2019) 1205-1212
IF_{2019}= 1,244

41A. D. Gajda*, A. J. Zaleski, A. Morawski, T. Cetner, M. Małecka, M. Rindfleisch, *„The optimization of J_c, B_{irr}, n value, wires diameter, and research of the dominant pinning mechanism for*

applications of undoped MgB_2 in superconducting multi-section coils" JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM 33 (2020) 3717-3725.
IF_{2020}= 1,506

42A. D. Gajda*, A.J. Zaleski, A. Morawski, T. Cetner, M. Rindfleisch, *„The influence of wire bending and wire diameter on transport critical current density in small MgB_2 superconducting coils for applications in multi-section coils"* JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM 33 (2020) 3395-3399.
IF_{2020}= 1,506

43A. G Bovone*, M. Capra, C. Bernini, F. Loria, T. Cetner, **D. Gajda**, A. Morawski, A. Ballarino, S.C. Hopkins, M. Tropeano, G. Grasso, M. Putti, C. Ferdeghini, A.S. Siri, M. Vignolo, *„Reverse advance internal magnesium diffusion process to produce dense MgB_2 bulks and high J_c wires through high pressure heat treatment"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 33 (2020) 125003.
IF_{2020} = 3,219

44A. H. Yetiş*, D. Avcı, F. Karaboğa, **D. Gajda**, M. Akdoğan, İ. Belenli, *„An innovative approach to fabricate MgB_2/Fe IMD wires by magnesium powder method"* PHYSICA B : CONDENED MATTER 593 (2020) 412277.
IF_{2020} = 2,436

45A. M.S.A. Hossain*, C. Senatore, Y. Yamauchi, M. Mustapić, **D. Gajda**, D. Patel, A. Khan, J.H. Kim, A.J. Morawski, R. Flukiger*, *„Interplay between cold densification and malic acid addition ($C_4H_6O_5$) for the fabrication of near-isotropic MgB_2 conductors for magnet application"* JOURNAL OF MAGNESIUM AND ALLOYS 8 (2020) 493-498.
IF_{2020} = 7,115

46A. D. Gajda*, A.J. Zaleski, A.J. Morawski, W. Haßler, K. Nenkov, M.A. Rindfleisch, Md. S.A. Hossain, *„Pinning mechanism and engineering critical current density considerations in the design of MgB_2 superconducting coils"* PHYSICA C: SUPERCONDUCTIVITY 570 (2020) 1353606.
IF_{2020} = 1,241

47A. Md S. A. Hossain*, M. Mustapić, **D. Gajda**, C. Senatore, D. Patel, Y. Yamauchi, M. Shahbazi, R. Flukiger, *„Significant reduction of critical current anisotropy in malic acid treated MgB_2 tapes"* JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS 497 (2020) 166046.
IF_{2020} = 2,993

48A. D. Gajda*, A.J. Zaleski, A.J. Morawski, M. Małecka, K. Nenkov, M. Rindfleisch, Md.S. A. Hossain, T. Czujko, *„Effect of heat treatments under high isostatic pressure on the transport critical current density at 4.2 K and 20 K in doped and undoped MgB_2 wires"* MATERIALS 14 (2021) 5152
IF_{2021} = 3,748

49A. D. Gajda*, A.J. Zaleski, A. Morawski, M. Małecka, M. Akdoğan, F. Karaboğa, D. Avcı, H. Yetiş, I. Belenli, T. Czujko, *„Influence of amorphous boron grain size, high isostatic pressure, annealing temperature, and filling density of unreacted material on structure, critical parameters, n-value, and engineering critical current density in MgB_2 wires"* MATERIALS 14 (2021) 3600.
IF_{2021} = 3,748

50A. D. Gajda*, A.J. Zaleski, A.J. Morawski, M. Babij, D. Szymański, G. Gajda, M.A. Rindfleisch, M.S.A. Hossain, *„High transport critical current density in high magnetic fields at $Mg^{11}B_2$ wires made with nano ^{11}B"* FUSION ENGINEERING DESIGN 168 (2021) 112383.

IF_{2021} = 1,905

51A. D. Gajda*, A.J. Zaleski, A. Morawski, T. Czujko, D. Avci, F. Karaboga, M. Akdogan, H. Yetis, T. Cetner, I. Belenli, *„The significant influence of packing density of unreacted Mg+ 2B mixture and heat treatment conditions on some of critical parameters for MgB_2/Fe wires"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 889 (2021) 161665.
IF_{2021} = 6,371

52A. D. Gajda*, A.J. Zaleski, A.J. Morawski, M. Małecka, L.M. Tran, M. Rindfleisch, T. Durejko, T. Czujko*, *„High critical current density in the textured nanofiber structure in multifilament MgB_2 wires made by the powder-in-tube (PIT) technique"* MATERIALS 15 (2022) 5419.
IF_{2022} = 3,4

53A. K. Filar*, A. Morawski, A. Zaleski, L.M. Tran, T. Czujko, **D. Gajda**, *„Superconducting properties and microstructure changes after heat treatment of in situ MgB_2 wires with ex situ MgB_2 barriers"* JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM 35 (2022) 1491-1497.
IF_{2022} = 1,8

54A. K. Pentoś*, A. Wondołowska-Grabowska, G. Gajda, M. Babij, P. Chohura, A. Zaleski, E. Szpunar-Krok, W. Jobczyk, A. Romaniuk, **D. Gajda**, *„The effect on the germination vigour of cucumber seeds after receiving magnetic field treatment pre-sowing"* APPLIED SCIENCES 12 (2022) 5490.
IF_{2022} = 2,5

55A. H. Yetiş*, D. Avcı, F. Karaboğa, C. Aksoy, **D Gajda**, E. Martínez, F.M. Tanyıldızı, A. Zaleski, M. Babij, L.M. Tran, L. A. Angurel, G.F. De La Fuente, İ. Belenli, *„Transport and structural properties of MgB_2/Fe wires produced by redesigning internal Mg diffusion process"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 35 (2022) 045012.
IF_{2022} = 3,6

56A. G. Gajda*, K. Filar, A. Morawski, R. Diduszko, T. Czujko, **D. Gajda**, *„Impact of rare earth oxides metal (Dy, Tb, Er, Eu, Sm) admixtures on the structure, morphology, pinning centers and critical parameters of MgB_2 materials manufactured by ambient pressure sintering and hot isostatic pressure processes"* CERAMICS INTERNATIONAL 49 (2023) 36031-36043.
IF_{2023} = 5,1

57A. T. Czujko*, **D. Gajda***, M. Rindfleisch, M. Babij, A. Zaleski, *„Effect of low annealing temperature on the critical-current density of 2% C-doped MgB_2 wires used in superconducting coils with the wind-and-react (W&R) method—High-field and high-temperature pinning centers"* MATERIALS 16 (2023) 6157.
IF_{2023} = 3,1

58A. D. Avcı*, H. Yetiş, **D. Gajda**, M. Babij, L.M. Tran, F. Karaboğa, C. Aksoy, A. Zaleski, I. Belenli, *„Optimized superconducting MgB_2 joint made by IMD technique"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 36 (2023) 075004.
IF_{2023} = 3,7

59A. G. Gajda*, K. Filar, A. Morawski, **D. Gajda**, P. Przyslupski, *„The effect of C and (Er, Sm, Eu)$_2O_3$ doping and high isostatic pressing on superconducting properties of MgB_2 phase and volume of cylindrical MgB_2 ceramic samples"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 938 (2023) 168526.
IF_{2023} = 5,8

60A. H. Liang, D. Patel, M. Shahbazi, A. Morawski, D. Gajda, M. Rindfleisch, R. Taylor, Y. Yamauchi, M.S.A Hossain*, *„Recent progress in MgB_2 superconducting joint technology"* JOURNAL OF MAGNESIUM AND ALLOYS 11 (2023) 2217-2229.
IF_{2023} = 17,6

61A. D. Gajda*, A. Zaleski, A. Morawski, M. Babij, D. Szymański, M. Rindfleisch, D. Patel, M.S.A. Hossain, *„Influence of annealing temperature and isostatic pressure on microstructure and superconducting properties of isotopic $Mg^{11}B_2$ wires fabricated by internal Mg diffusion method"* JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 933 (2023) 167660.
IF_{2023} = 5,8

62A. D. Gajda*, M. Babij, A. Zaleski, M. Rindfleisch, *„Influence of the interfacial topological effect on the behavior of transport current in MgB_2 material in the Meissner state and mixed state"* JOURNAL OF APPLIED PHYSIC 136 (2024) 223903.
IF_{2024} = 2,5

63A. J. Ćwik*, Y. Koshkid'ko, P. Putyra, B. Weise, M. Małecka, **D. Gajda**, M. Babij, A. Czernuszewicz, *„Layered composite magnetic refrigerants for hydrogen liquefaction"* INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 87 (2024) 485-494.
IF_{2024} = 8,3

64A. D. Gajda*, A.J. Zaleski, M. Babij, M.A. Rindfleisch, *„Indication of the measuring method for accurately determining the critical current and n value in superconducting wires and tapes used in superconducting coils"* JOURNAL OF APPLIED PHYSIC 136 (2024) 053901.
IF_{2024} = 2,5

65A. D. Gajda*, M. Babij, A. Zaleski, D. Avci, F. Karaboga, H. Yetis, I. Belenli, T. Czujko*, *„Investigation of layered structure formation in MgB_2 wires produced by the internal Mg coating process under low and high isostatic pressures"* MATERIALS 17 (2024) 1362.
IF_{2024} = 3,2

66A. G. Gajda*, K. Filar, A. Morawski, **D. Gajda**, *„The influence of the HIP process on the microstructure, critical temperature and critical current density of double-doped (with Dy_2O_3+ C, and Tb_2O_3+ C) MgB_2 bulk compounds"* HIGH PRESSURE RESEARCH 44 (2024) 84-93.
IF_{2024} = 1,2

67A. D. Gajda*, M. Babij, A. Zaleski, D. Avci, H. Yetis, I. Belenli, F. Karaboga, D. Szymanski, T. Czujko*, *„The influence of two-region morphology and grain shape on the transport critical current density in the range from 15 K to 30 K in SiC-doped MgB_2 wires fabricated by the powder-in-tube method"* MATERIALS 18 (2025) 3960.
IF_{2025} = 3,2

68A. D. Avcı*, H. Yetiş, F. Karaboğa, **D. Gajda**, M. Babij, A. Zaleski, İ. Belenli, *„A new structural design to improve Mg diffusion in IMD MgB_2 wires"* SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 38 (2025) 065006.
IF_{2025} = 4,2

69A. D. Gajda*, M. Babij, D. Avci, H. Yetis, I. Belenli, D. Szymanski, T. Czujko, F. Karaboga, A. Zaleski, *„Study of the interfacial topological effect in in situ MgB_2 wires with Fe shield"* CERAMICS INTERNATIONAL 51 (2025) 62875-62883.
IF_{2025} = 5,6

70A. D. Gajda*, Micha Babij , Andrzej Zaleski , Dogan Avci , Hakan Yetis , Ibrahim Belenli , Fırat Karaboga , Damian Szymanski , Tomasz Czujko, *„The diffusion of Fe from the shield into the in situ MgB_2 material in superconducting wires"* PHYSICA C: SUPERCONDUCTIVITY 639 (2025) 1354816.
IF_{2025} = 1

71A. D. Gajda*, *„The point pinning centers and critical current density in NbTi wires"* JOURNAL OF APPLIED PHYSIC 138 (2025) 233904.
IF_{2025} = 2,5

Pozostałe publikacje naukowe nie znajdujące się w bazie Journal Citation Reports (JRC – materiały pokonferencyjne)

Wykaz opublikowanych artykułów **przed uzyskaniem stopnia doktora:**

1B. D. Gajda*, *„Cewki nadprzewodnikowe – zastosowanie"* Technical and Econmic Aspect of Modern Technology Transfer in Context of Integration with Europen Union", Złoty Potok – Częstochowa, 25 – 27.10.2004.

2B. D. Gajda *, *„Cewki nadprzewodnikowe"* V Seminarium „Zastosowania Nadprzewodników" Lublin – Nałęczów, 23–26.06.2005, strony - 243 – 250.

3B. D. Gajda*, *„Cewki nadprzewodnikowe – jednorodność pola magnetycznego"* VI Środkowoeuropejska Konferencja - Metody i Systemy Komputerowe w Automatyce i Elektronice, Poraj – Częstochowa, 16 – 17.09.2005, strony - 211 – 216.

4B. D. Gajda*, J. Sosnowski, *„Wykorzystanie nadprzewodników do wytwarzania silnych pól magnetycznych"* NOWA ELEKTROTECHNIKA (2005), strony - 28-29.

5B. D. Gajda*, J. Sosnowski, *„Wybrane badania konstrukcyjne elektromagnesów nadprzewodnikowych"* PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI 226 (2006) 113-124.

6B. D. Gajda*, J. Sosnowski, *„Badania modelowo-konstrukcyjne elektromagnesów nadprzewodzących"* PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY 82 (2006) 25-28.

7B. D. Gajda*, *„Wpływ pola magnetycznego, temperatury i czynników zewnętrznych na wartości krytycznego prądu w taśmach nadprzewodnikowych Bi–2223"* VII Seminarium - Zastosowania Nadprzewodników, Lublin – Kazimierz Dolny, 1–3.06.2006 17, strony - 161 – 170.

8B. D. Gajda*, *„Elektromagnesy nadprzewodnikowe – konstrukcja elektromagnesów nadprzewodnikowych i pomiary pola magnetycznego w cewkach nadprzewodnikowych w temperaturze helowej i pokojowej"* VII Seminarium - Zastosowania Nadprzewodników, Lublin – Kazimierz Dolny, 1–3.06.2006, strony -171 – 180.

9B. T. Koutzarova*, I. Nedkov, K. Grigorov, J.-Ph. Mathieu, M. Ausloos, Gh. Ghelev, T. Palewski, **D. Gajda**, *„Structural and magnetic properties of nanosized barium hexaferrite powders obtained by microemulsion techniques"* NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY 7 (2007) 56 – 58.

10B. J. Sosnowski*, **D. Gajda**, *„Analiza zamrożonego strumienia w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych"* PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI 231 (2007) 125-134.

11B. D. Gajda*, J. Sosnowski*, *„The degradation effects in HT_c Bi–2223 superconducting tapes"* PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI 232 (2007) 5-14.

12B. D. Gajda*, A. Morawski, A. Presz, A. Zaleski, A. Kario, *„The comparison of current densities of the NbTi/Cu multifilament wires with MgB_2/Fe monofilament ones"* PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY 85 (2009) 204-207

13B. D. Gajda*, A. Morawski, A. Presz, A. Zaleski, *„Extremely positive effect of the cold drawing on critical current density of the SKNT-8910 NbTi wire"* PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY 85 (2009) 208-211.

14B. V.A. Beloshenko, V.P. Dyakonov, V.V. Chishko*, N.I. Matrosov, O.N. Mironova, **D. Gajda,** A.J. Zaleski, R. Puzniak, *„Effect of deformation by equal channel multiangle pressing on functional properties of NbTi based superconductor"* FUNCTIONAL MATERIALS 16 (2009) 174 – 178.

15B. V.A. Beloshenko, N.I. Matrosov, V.V. Chishko*, V.P. Dyakonov, E. A. Pawłovskaya, L.F. Sennkova, H. Szymczak, **D. Gajda**, A.J. Zaleski, S. Piechota, *„Своиства многоволокнистого схерхроводящего композита после равноканального многоуглового прессования"* ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ 2 (2009) 59-65.

16B. D. Gajda*, A. Morawski, A.J. Zaleski, T. Cetner, and A. Presz, *„Enhancement of critical current density in superconducting wires NbTi"* PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY 87 (2011) 209-213.

17B. D. Gajda*, A. Morawski, A. Zaleski, T. Cetner, M. Rindfleisch, M. Tomsic, *„The pinning forces created by various of pinning centers in MgB_2/Cu or MgB_2/Cu alloys, wires and tapes"* International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (ICEC 23 and ICMC 2010), Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, (2011), strona - 1243 – 1247

18B. T. Cetner*, A. Morawski, M. Rindfleisch, M. Tomsic, A. Presz, **D. Gajda D,** A. Zaleski, *„The high gas pressure HIP influence on structure and transport properties of MgB_2 superconductors of single and multicore composition"* International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (ICEC 23 and ICMC 2010), Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej (2011), strona - 1237 – 1242.

19B. M. Woźniak*, S.C. Hopkins, **D. Gajda**, B.A. Głowacki, *„Improvement of the critical current of in situ Cu-sheathed MgB_2 wires by copper additions and toluene doping"* PHYSICS PROCEDIA 36 (2012) 1594 – 1598.

20B. B.P. Mikhailov*, V.Ya. Nikulin, P.V. Silin, A.B. Mikhailova, N.A. Mineev, **D. Gayda**, V. F. Shamrai, *„Influence of conditions of shock-wave effect of plasma on the structure and current-carrying capacity of multilayer high-temperature superconducting tapes"* INORGANIC MATERIALS : APPLIED RESEARCH 520 (2014) 179-183.

Publikacje naukowe opublikowane **po obronie pracy doktorskiej**

21B. D. Gajda*, A. Morawski, A.J. Zaleski, W. Häßler, K. Nenkov, M. Rindfleisch, T. Cetner and M. Tomsic, *„Evidence of point pinning centers in un-doped MgB_2 Wires at 20 K after HIP process"* JOURNAL OF MATERIAL SCIENCE & ENGINEERING 5 (2016) 1000244.

22B. K. Buchkov*, E. Nazarova, N. Balchev, **D. Gajda,** K. Nenkov, A. Zahariev, *„Electro-transport studies of silver doped $FeSe_{0,94}$ superconducting system"* AIP CONFERENCE PROCEEDINGS 1 (2016) 080002.

23B. K Buchkov*, M Valkovski, D Gajda, K Nenkov and E Nazarova, *„Inter-granular effects at high magnetic fields of cuprate and iron chalcogenide superconducting materials"* JOURNAL OF PHYSICS : CONFERENCE SERIES 1186 (2019) 012004.

Rozdziała w książce

1C. T. Adachi, G. Aeppli ..... **D. Gajda** *Superstripes 2016 - Book of Abstracts* Science Series No.8, Publisher: Superstripes Press, Rome, Italy, Editor: Antonio Bianconi, ISBN: 978-88-6683-055-9, High-Temperature Superconductors: Occurrence, *Synthesis and Applications, Chapter 8. Superconducting and Multiband Effects in FeSe with Ag Addition*
Editors: Muralidhar Miryala and M. R. Koblischka
Pub. Date: 2018 - 2nd quarter **ISBN:** 978-1-53613-341-7

II. WYKAZ AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ ALBO ARTYSTYCZNEJ

1. Wykaz członkostwa w redakcjach naukowych monografii.
   Nie dotyczy

2. Wykaz wystąpień na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych lub artystycznych, z wyszczególnieniem przedstawionych wykładów na zaproszenie i wykładów plenarnych.

Referaty po uzyskaniem stopnia doktora

Wykłady zaproszone i plenarne

- **D. Gajda**, A. Morawski, A. Zaleski, M. Rindfleisch, M. Tomsic, W. Häßler, K. Nenkov, A. Yamamoto, M. Akdoğan, Y. Hakana, M. Małecka, B. İbrahim, K. Buchkov, E. Nazarova, N. Balchev, T. Cetner, 2016
  „The influence of 1 GPa isostatic pressure on pinning centers and critical parameters in MgB_2 wires and iron-based superconducting materials"
  19th International School on Condensed Matter Physics "Advances in Nanostructured Condensed Matter: Research and Innovations – Varna, Bulgaria, 28.08 – 02.09.2016
- **D. Gajda**, A. Morawski, A. Zaleski, T. Cetner, M. Rindfleisch, M. Tomsic, W. Häßler, K. Nenkov, A. Yamamoto, M. Akdoğan, Y. Hakana, M. Małecka, B. Ibrahim, K. Buchkov, E. Nazarova, N. Balchev, Ł Fajfrowski
  „The influence of 1 GPa isostatic pressure on J_c, B_{irr}, B_{c2} and T_c in MgB_2 wires and iron-based superconducting materials"
  Superstripes, Ischia, Italy 23.06-29.06.2016
- **D. Gajda**, M. Babij , A.J. Zaleski , L.M. Tran, A.J. Morawski, D. Szymański, M.A. Rindfleische, M.S.A. Hossain
  „Critical current density in MgB_2 wires with nano-amorphous isotopic boron (^{11}B) made by CTFF method"
  The 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM) 2023, Ölüdeniz-Fethiye, Türkiye, 04.05-11.05.2023
- **D. Gajda**
  "Critical current density in superconducting wires and tapes – applications"

The European Course of Cryogenics (U-Dresden, Wroclaw University of Science and Technology (WUST) and Norwegian, University of Science and Technology (NTNU)) od 26.08 do 30.08.2024

- **D. Gajda**, M. Babij, A. Zaleski
  „Properties and applications of MgB_2 wires for coils"
  Superconductivity & Particle Accelerators (SPAS)
  Kraków, Poland, 21.10-24.10.2024
- **D. Gajda**, M. Babij, A. Zaleski, D. Avci, F. Karaboga, H. Yetis, I. Belenli, D. Zasada, D. Szymański, M. Małecka, W. Gil, T. Czujko
  „Study of the morphology of Sm_2O_3 doped MgB_2 wires by using the transmission electron microscope"
  10th International Conference on Superconductivity and Magnetism- ICSM2025, Ölüdeniz-Fethiye, Türkiye, 26.04 - 03.05.2025.
- **D. Gajda**
  „Superconducting wires and tapes – critical current density and applications"
  The European Course of Cryogenics (U-Dresden, Wroclaw University of Science and Technology (WUST) and Norwegian University of Science and Technology (NTNU)) od 25.08 do 29.08.2025

Pozostałe wykłady

- **D. Gajda**, A. Morawsk, A. Zaleski, M. Małecka, E. Żuchowska, T. Cetner, K. Nenkov, W. Haßler, M. Tomsic, M. Rindfleisch, P. Surdacki
  „Influence of hot isostatic pressure (HIP) on J_c, F_p, T_c, B_{irr}, B_{c2} and microstructure of MgB_2 wires"
  8th Electromagnetic devices and processes in environment protection and 11th Applications of superconductors, Nałęczów, 28.09.2014 – 01.10.2014
- **D. Gajda**, A. Morawski, M. Rindfleisch. A. Zaleski, T. Cetner
  „Krytyczna gęstość prądu w przewodach MgB_2"
  VIII Konferencja Naukowa Postępy Elektrotechnologii, Jamrozowa Polana, 23 – 25.09.2015
- **D. Gajda**, A. Morawski, A. Zaleski, T. Cetner, M. Tomsic. M. Rindfleisch, W. Haßler, K. Nenkov, T. Czujko,
  „Influence of HIP process on structure and the critical parameters of MgB_2 wires"
  XXI Physical Metallurgy and Materials Science Conference Advanced Materials and Technologies (AMT 2016), Rawa Mazowiecka, 05.06-08.06 2016
- **D. Gajda**, A. Morawski, A. Zaleski, T. Cetner, M. Rindfleisch, M. Tomsic, W. Häßler, K. Nenkov, A. Yamamoto, M. Akdoğan, Y. Hakana, M. Małecka, B. İbrahim, K. Buchkov, E. Nazarova, N. Balchev, Ł. Fajfrowski,
  „The influence of HIP process on critical parameters in MgB_2 wires and iron based superconducting materials"
  VI Functional nanomaterials and high-purity substances, Susdal – Moskwa, Russia 03 – 07.10.2016
- **D. Gajda**, A. Morawski, A. Zaleski, A. Yamamoto, M Małecka, T Cetner and K. Rogacki
  „Improvement of pinning centers density and structure by using high hot isostatic pressure of 1.2 GPa in $Ba(Fe_{0.92},Co_{0.08})_2As_2$ superconducting material"
  The 5th Italian Conference on Magnetism, Assisi, Italy 13-15.09.2017
- **D. Gajda**
  „Enhancement of the pinning centers density and structure by using hot isostatic pressure of 1.2 GPa in $Ba(Fe_{0.92},Co_{0.08})_2As_2$ superconducting materials"
  Ist Workshop Projektu – MAGNES (ERA.Net RUS Plus)

International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures PAS, Wrocław, 02-03.02.2017

- **D. Gajda**, A. Morawski, A. Zaleski, M. Rindfleisch, M. Tomsic, W. Häßler, K. Nenkov, A. Yamamoto, M. Małecka, T. Cetner, K. Rogacki
  „The influence of HIP process on pinning centers, critical current density and structure in MgB_2 wires and $Ba(Fe_{0.92},Co_{0.08})_2As_2$ superconducting material"
  9th Electromagnetic devices and processes in environment protection and 12th Applications of superconductors, Nałęczów, 03.12.2017 – 06.12.2017
- **D. Gajda**, A. Zaleski, A. Morawski, M. Rindfleisch, T. Cetner, D. Majchrzak, S. Hossain, K. Nenkov, W. Häßler
  „High field pinning centers in NbTi wires and MgB_2 wires"
  20th Jubilee International School on Condensed Matter Physics, Physics and Applications of Advanced and Multifunctional Materials, Warna, Bułgaria , 03.09 – 07.09.2018
- **D. Gajda**, M. Babij, A. Zaleski, L. M. Tran, D. Avcı, H. Yetiş, İ. Belenli, F. Karaboğa, G Gajda
  „The creation of high-field and high-temperature pinning centers in Sm_2O_3 doped MgB_2 wires and bulks"
  International Conference on Sensor, Detector, Materials Science and Technologies - SensDeTech, Bolu (05.10 – 07.10.2023), Türkiye
- **D. Gajda**, M. Babij, A. Zaleski, D. Avci, F. Karaboga, H. Yetis, I. Belenli, D. Zasada, D. Szymański, M. Małecka, W. Gilf, T. Czujko
  "The influence of Sm_2O_3 admixtures on morphology, transport critical current density and dominant pinning mechanism of MgB_2 materials investigated by using the transmission electron microscope"
  21st National Conference on Superconductivity, Kraków, Poland, 22.09 – 26.09.2024

Sesje posterowe

- **D. Gajda**, A. Morawski i M. Rindfleisch
  „Nadprzewodzące przewody MgB_2 o wysokiej gęstości prądu krytycznego do zastosowań w turbinach wiatrowych i wodnych"
  I Ogólnopolskie Sympozjum Energii Odnawialnej , OZE – Energia przyszłości Lublin, 28 – 29.11.2015
- **D. Gajda**, J. Ćwik
  „Low temperature refrigerants based on laves-phase pseudo-binary $(Dy,Er)Ni_2$ intermetallic compounds"
  12 th International Advances in Applied Physic & Materials Science Congress & Exhibition, 13.10-19.10.2022, Mugla, Turkey
- **D. Gajda**, J. Ćwik, Y. Koshkidko, K. Kowalska, B. Weise, N. de Oliveira
  „Magnetic and thermodynamic properties in the doped $Ho_{1-x}Er_xNi_2$ solid solutions"
  The 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM) 2023, Ölüdeniz-Fethiye, Türkiye, 04.05-11.05.2023
- **D. Gajda**, M. Babij, A.J. Zaleski , L.M. Tran, A.J. Morawski, D. Szymański, M. Rindfleisch,T. Czujko, M.S.A. Hossain
  „Critical current density in straight undoped MgB_2 wires and small coils undoped MgB_2 with nano-amorphous isotopic boron (^{11}B) made by IMD method"
  MT-28 - International Magnet Technology Conference, Aix-en-Provence, France, 10.09-15.09.2023.

III. KONFERENCJE NAUKOWE

1. Wykaz udziału w komitetach naukowych konferencji międzynarodowych

   a) International Conference on Sensor, Detector, Materials Science and Technologies - SensDeTech, Bolu (October, 2023), Türkiye

   b) International Conference on Sensor, Detector, Materials Science and Technologies - SensDeTech, Bolu (October, 2025), Türkiye

   c) Współorganizator sesji naukowej poświęconej materiałowi nadprzewodnikowemu MgB_2 na konferencji - ICSM2025, Ölüdeniz-Fethiye, Turcja, 26.04 - 03.05.2025.

2. Kierownik sesji naukowych na konferencja międzynarodowych
   a) Superstripes, Ischia, Italy 23.06-29.06.2016
   b) ICSM2025, Ölüdeniz-Fethiye, Turcja, 26.04 - 03.05.2025

IV. WYKAZ UCZESTNICTWA W PRACACH ZESPOŁÓW BADAWCZYCH REALIZUJĄCYCH PROJEKTY FINANSOWANE W DRODZE KONKURSÓW KRAJOWYCH LUB ZAGRANICZNYCH, ORAZ Z UWZGLĘDNIENIEM INFORMACJI O PEŁNIONEJ FUNKCJI W RAMACH PRAC ZESPOŁÓW

a) Kierownik projektów

- 01.08.2023 - 30.07.2024 *Tworzenia średnio i wysoko polowych oraz wysoko temperaturowych centrów kotwiczenia w przewodach MgB_2 za pomocą domieszkowania tlenkiem samaru (Sm_2O_3)* – projekt finansowany przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu Miniatura 7
- 2015 -2017 *Investigation of transport and mixed state properties of Iron-chalcogenide FeSe system modified by Ag addition/doped* – projekt finansowany przez Polską i Bułgarska Akademie Nauk
- 2018 – 2020 *Investigation of non-conventional superconductors and magnetic biogenic nanoparticle materials* - projekt finansowany przez Polską i Bułgarska Akademie Nauk

b) Wykonawca projektów

- 2010 – 2013 *Nowa metoda wytwarzania wysokoprądowych kabli nadprzewodzących MgB_2 o strukturze Cu/ex/in situ MgB_2, z nanomateriałów, z wykorzystaniem technologii SHS, MA oraz HIP, optymalizacja parametrów elektrycznych i wytwarzania pod kątem produkcji* – projekt finansowany przez Polish Ministry of Science and Information
- 2015 – 2017 *Opracowanie niskotemperaturowych materiałów magnetycznie twardych oraz wysokoprądowych wysokopolowych nadprzewodników na bazie Fe dla innowacyjnych technologii* – projekt międzynarodowy finansowany przez Unie Europejska w ramach programu ERA.NET Rus Plus Innovation
- 2017 – 2029 *Effect of densification on innovative MgB_2-based superconducting wires through HIP process – high field pinning centers* – projekt finansowany przez Polską i Włoską Akademie Nauk.
- 2019 – 2023 *Opracowanie metody otrzymywania kompozytowych czynników chłodniczych na bazie magnetycznych związków międzymetalicznych przy wykorzystaniu izostatycznej syntezy wysokociśnieniowej* - projekt finansowany przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu Opus 17.

- *„Koncepcja osiągnięcia przez środki ogniowe Wojsk Rakietowych i Artylerii zdolności do oddziaływania na cele za pomocą impulsu elektromagnetycznego" 2022 -2025*
  Projekt finansowany przez Ministerstwo Obrony Narodowej : *numer grantu 406/2022/DA/GB2*. Habilitant pełnił role koordynatora projektu w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN.

c) Inne projekty badawcze
- 2005 - 2016 Rada Naukowa w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Nikich Temperatur PAN co roku akceptowała projekty badawcze, które były wykonywane w bieżącym roku. Habilitant kierowałem badaniami, które dotyczyły pomiarów parametrów krytycznych materiałów nadprzewodnikowych np. w przewodach, taśmach, pastylkach NbTi, MgB_2, HTS.

V. WYKAZ STAŻY W INSTYTUCJACH NAUKOWYCH LUB ARTYSTYCZNYCH, W TYM ZAGRANICZNYCH, Z PODANIEM MIEJSCA, TERMINU, CZASU TRWANIA STAŻU I JEGO CHARAKTERU

- Staż naukowy w Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk w Warszawie – czteromiesięczny od 02.07 do 29.10.2021.
- Staż badawczy w Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bułgaria – sześć tygodni w latach 2015 – 2020.
- Staż naukowy w SuPerconductors, oxides and other INnovative materials and devices (CNR SPIN), Genua, Włochy – trzy tygodnie w latach 2017 – 2019
- Sataż naukowy w Institute for Solid State and Materials Research Dresden, Drezno, Niemcy – sześć tygodni w latach 2013 do 2016
- Staż badawczy w Applied Superconductivity and Cryoscience Group Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge, Wielka Brytania - tygodniowy pobyt w roku 2016.

VI. WYKAZ CZŁONKOSTWA W KOMITETACH REDAKCYJNYCH I RADACH NAUKOWYCH CZASOPISM WRAZ Z INFORMACJĄ O PEŁNIONYCH FUNKCJACH (NP. REDAKTORA NACZELNEGO, PRZEWODNICZĄCEGO RADY NAUKOWEJ, ITP.)

- Gościnny edytor w czasopiśmie Materials – Wydanie specjalne pt. *Superconductors: Materials and Technology* od 2022 do 2023.
- Gościnny edytor w czasopiśmie Materials – Wydanie specjalne pt. *Advanced Superconducting Materials and Technology* od 2024 do 2026.
- Członkowie redakcji czasopisma - Advanced Superconductivity
  Habilitant jest Honorary Research Fellow of Advanced Superconductivity

VII. WYKAZ RECENZOWANYCH PRAC NAUKOWYCH LUB ARTYSTYCZNYCH, W SZCZEGÓLNOŚCI PUBLIKOWANYCH W CZASOPISMACH MIĘDZYNARODOWYCH

Numer	Nazwa czasopisma	Liczba wykonanych recenzji
1	Superconductor Science and Technology	8
2	Journal of Superconductivity and Novel Magnetism	6
3	IEEE Transactions on Applied Superconductivity	4
4	Scientific Reports	2
5	Journal of Alloys and Compounds	12
6	Rare Metals	1

7	ACS Omega	1
8	Journal of Magnetism and Magnetic Materials	2
9	Structural Chemistry	1
10	Materials Today Communications	3
11	Journal of Applied Physics	1
12	Ceramics International	7
13	Ultrasonics Sonochemistry	1
14	Materials Today Physics	1
15	Materials	1
16	Acta Physica Polonica A	2
17	Journal of Alloys and Compounds Communications	2
18	Vacuum	1
19	Case Studies in Chemical and Environmental Engineering	1
20	Superconductivity	3
21	Cryogenics	2
22	Physica B: Condensed Matter	2
23	Physica C: Superconductivity and its applications	2
24	Chinese Journal of Physics	1
25	Journal of Materials Research and Technology	1
26	Nanotechnology	1
27	Physica Scripta	1
28	Journal of Magnesium and Alloys	2

Habilitant wykonał 72 recenzji dla 28 czasopism naukowych.

VIII. WYKAZ UCZESTNICTWA W PROGRAMACH EUROPEJSKICH LUB INNYCH PROGRAMACH MIĘDZYNARODOWYCH

- Wykonawca w programie badawczym European Atomic Energy Community (EURATOM – w roku 2011)

IX. WSPÓŁPRACE Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM

1. Wykaz dorobku technologicznego.

   Brak

2. Współpraca z sektorem gospodarczym w kraju i zagranica
   - Przedsiębiorstwo Badawczo-Wdrożeniowe „Frako-Term" Sp. z o.o (Toruń)
   - GeniCore Spółka z o.o., (Warszawa)
   - Hyper Tech Research, Inc., Columbus, OH, United States

3. Wykaz uzyskanych praw własności przemysłowej, w tym uzyskanych patentów krajowych lub międzynarodowych.

   Brak

4. Wykaz wdrożonych technologii.

   Brak

5. Wykaz wykonanych ekspertyz lub innych opracowań wykonanych na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców.

Wykonanie pomiarów parametrów krytycznych dla komercyjnych przewodów nadprzewodnikowych NbTi i MgB_2 na zamówienie.

6. Wykaz udziału w zespołach eksperckich lub konkursowych.

Brak

7. Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe

- Wykonanie dwóch układów pomiaru prądu krytycznego w temperaturze 4.2 K (Miedzynarodowe Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych PAN) i 20 K (Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN)
- Opracowanie nowej metody pomiarowej prądu krytycznego – metoda relatywna (*field sweep type*)
- Opracowanie metody wykrywającej uszkodzenia w barierach dyfuzyjnych w przewodach MgB_2

X. WSPÓŁPRACE Z INSTYTUTAMI I UCZELNIAMI

1. Krajowymi

- Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk we Warszawie
- Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk we Warszawie
- Wojskowa Akademia Techniczna we Warszawie

2. Zagranicznymi

- Institute for Solid State and Materials Research Dresden, Dresden, Niemcy
- Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, Pembroke Street, Cambridge, Wielka Brytania
- Institute of Superconducting and Electronic Materials, Australian Institute for Innovative Materials (AIIM), University of Wollongong, Squires Way, North Wollongong, NSW 2500, Australia
- Abant Izzet Baysal University, Department of Physics, Bolu, Turcja
- A.A. Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, NASU, Donetsk, Ukraina
- B.Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of NASU, Kharkov, Ukraina
- Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bułgaria
- CNR SPIN (SuPerconductors, oxides and other INnovative materials and devices) Institute, Genova, Italy
- Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokio, Japonia
- School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia
- Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan
- Normandie University, Ensicaen, Unicaen, CNRS, CRISMAT, Caen, France

XI. Habilitant pełni funkcje kierownika seminarium naukowego w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu (od 01.09.2014 do 30.09.2017).

XII. BIBLIOMETRYCZNE PODSUMOWANIE DOROBKU NAUKOWEGO

Open Researcher and Contributor ID (ORCID): **0000-0002-6960-3745**

Dane bibliometryczne:

- **Web of Science Core Collection** (23.02.2026 r.)
  Researcher ID:
  Liczba zidentyfikowanych publikacji: 88
  Całkowita liczba cytowań : 890 (bez autocytowań - 502)
  Wskaźnik Hirscha: 20

- **Scopus**
  Researcher ID: 23569290300
  Liczba zidentyfikowanych publikacji: 91
  Całkowita liczba cytowań: 915
  Wskaźnik Hirscha: 20

- **Google Scholar**
  Liczba zidentyfikowanych publikacji: 102
  Całkowita liczba cytowań : 1041
  Wskaźnik Hirscha : 22
  Wskaźnik i-10: 40

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

Sumaryczny Impact Factor z 103 publikacji – 251,576

.....Daniel Gajda.....
(podpis wnioskodawcy)