

Szymon Polegaj², Mateusz Wójcik², Aleksander Nowak²,
Mikołaj Górny², Joanna Pisarczyk², Sylwia Hajdasz¹,
Paweł Szcześniak¹

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki (1)

Uniwersytet Zielonogórski, Studenckie Koło Naukowe SEP Uniwersytetu Zielonogórskiego, SEP Oddział Zielonogórski (2)

Mikrouszkodzenia wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji

1. Abstrakt

Zjawisko nadprzewodnictwa otwiera szerokie możliwości zastosowań, zwłaszcza w medycynie, przemyśle oraz elektroenergetyce. W artykule omówiono technologie nadprzewodnikowe, koncentrując się na taśmach nadprzewodnikowych drugiej generacji (HTS 2G) oraz ich mikrostrukturze. Taśmy HTS 2G, oparte na nadprzewodniku – tlenku itrowo-barowo-miedziowym (YBCO), wykonywane są w technologii cienkowarstwowej, a ich produkcja jest wciąż udoskonalana. Badania mikrostrukturalne taśm HTS 2G przeprowadzono za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz spektroskopii promieniowania rentgenowskiego z dyspersją energii (EDS). Analiza pozwoliła na ocenę struktury warstw nadprzewodnika, srebra, podłoża Hastelloy oraz warstw buforowych. Wyniki wskazują, że pomimo wysokiej jednorodności oraz jakości warstw, co jest kluczowe dla stabilności parametrów krytycznych i efektywności urządzeń nadprzewodnikowych, w taśmach występują mikrodefekty mogące mieć znaczenie dla trwałości taśm HTS. Uzyskane dane są istotne z punktu widzenia zastosowań taśm HTS w elektroenergetyce i przemyśle nowoczesnych materiałów.

The phenomenon of superconductivity opens up wide possibilities for applications, particularly in medicine, industry, and power engineering. This article discusses superconducting technologies, focusing on second-generation high-temperature superconducting (2G HTS) tapes and their microstructure. 2G HTS tapes, based on the yttrium barium copper oxide (YBCO) superconductor, are manufactured using thin-film technology, and their production is continuously being improved. Microstructural studies of 2G HTS tapes were carried out using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The analysis enabled the assessment of the structure of the superconductor, silver, Hastelloy substrate, and buffer layers. The results indicate that despite the high homogeneity and quality of the layers—which is crucial for the stability of critical parameters and the efficiency of superconducting devices—microdefects are present in the tapes, which may affect the durability of HTS tapes. The obtained data are significant from the perspective of applying HTS tapes in power engineering and the advanced materials industry.

Słowa kluczowe: nadprzewodnictwo, wysokotemperaturowe taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji, badania mikrostrukturalne.

Keywords: superconductivity, second-generation high-temperature superconducting tapes, microstructural analysis.

2. Wstęp

Nadprzewodnictwo stanowi jedno z najciekawszych zjawisk fizycznych w materiałoznawstwie i elektrotechnice. Charakteryzuje się całkowitym zanikiem rezystancji elektrycznej oraz efektem Meissnera, czyli wypieraniem pola magnetycznego z wnętrza materiału po ochłodzeniu poniżej temperatury krytycznej. Ta unikalna kombinacja właściwości czyni nadprzewodniki atrakcyjnymi dla zastosowań w wielu dziedzinach nauki i technologii, w tym w medycynie, przemyśle oraz elektroenergetyce. Rozwój technologii nadprzewodnikowych jest kluczowy dla zaspokojenia rosnących potrzeb energetycznych i wdrażania zrównoważonych rozwiązań energetycznych. Technologie nadprzewodnikowe znalazły szerokie zastosowanie w diagnostyce medycznej, szczególnie w obrazowaniu metodą rezonansu magnetycznego (MRI) [1]. Magnesy nadprzewodnikowe umożliwiają generowanie silnych i stabilnych pól magnetycznych, co pozwala na uzyskiwanie precyzyjnych obrazów struktur anatomicznych [2], [3]. W spektroskopii magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR) nadprzewodniki są wykorzystywane do badań strukturalnych w chemii i biologii, wspierając analizy molekularne i badania nad dynamiką reakcji chemicznych. Nadprzewodniki odgrywają również kluczową rolę w akceleratorach cząstek, takich jak Wielki Zderzacz Hadronów (LHC) w CERN, gdzie silne pola magnetyczne są wykorzystywane do kierowania wiązek cząstek i przyspieszania ich do ekstremalnych prędkości [4].

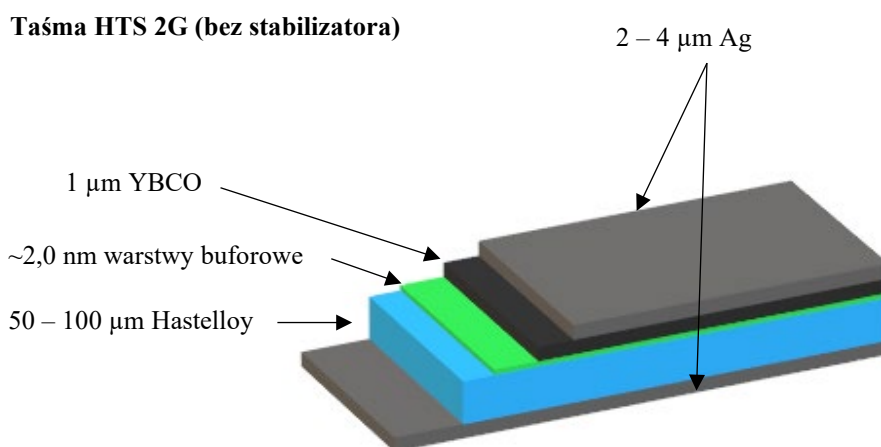
Rozwój nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego (HTS) otworzył nowe możliwości dla sektora elektroenergetycznego. Kriokable, czyli przewody nadprzewodnikowe ochładzane do temperatur kriogenicznych, oferują niemal zerowe straty energii i wysoką gęstość prądu, co czyni je atrakcyjną alternatywą dla konwencjonalnych kabli miedzianych [5], [6]. Dzięki mniejszym wymiarom i eliminacji strat Joule'a kriokable umożliwiają bardziej efektywny przesył energii, a ich instalacja wymaga mniej miejsca w infrastrukturze [7]. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu zwarciovego (SFCL) stanowią kolejne przełomowe rozwiązanie. Urządzenia te reagują niemal natychmiast na nagłe wzrosty prądu, przechodząc ze stanu nadprzewodnictwa w stan rezystywny i tym samym ograniczając prąd zwarciový [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]. Rozwiązanie to zapewnia ochronę sieci energetycznych przed uszkodzeniami oraz zwiększa stabilność systemu elektroenergetycznego. Obecnie na świecie zainstalowanych jest kilkadziesiąt SFCL, a wiele projektów pilotażowych jest w fazie rozwoju [15]. Nadprzewodnikowe magazyny energii (SMES) to systemy przeznaczone do magazynowania energii w postaci pola magnetycznego wytwarzanego przez prąd przepływający przez uzwojenia nadprzewodnikowe [16]. SMES cechują się wysoką sprawnością (nawet do 95%) oraz szybkim czasem reakcji, co czyni je idealnymi do kompensacji chwilowych spadków napięcia i stabilizacji sieci elektroenergetycznych. Pomimo wysokich kosztów produkcji i eksploatacji, liczne projekty badawcze nad SMES prowadzą do ciągłej optymalizacji tych systemów [17], [18]. Transformatory nadprzewodnikowe oferują znaczącą redukcję strat energii w porównaniu z konwencjonalnymi transformatorami z uzwojeniami miedzianymi. Straty Joule'a w uzwojeniach nadprzewodnikowych są niemal całkowicie eliminowane, co przekłada się na zwiększenie sprawności urządzenia. Dodatkowo, transformatory nadprzewodnikowe mogą być o 30-40% mniejsze i lżejsze niż ich konwencjonalne odpowiedniki, co pozwala na bardziej elastyczne projektowanie systemów elektroenergetycznych i redukcję kosztów instalacji [19].

Do urządzeń nadprzewodnikowych niezbędne są odpowiednie materiały nadprzewodnikowe, które obecnie produkuje się głównie w postaci wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji (HTS 2G) [11], [20], [21]. Taśmy te produkowane są w technologii wielowarstwowej i składają się z cienkiej warstwy nadprzewodnika osadzonej na elastycznym podłożu, zazwyczaj wykonanym z niklu lub jego stopów [22]. Warstwy buforowe oraz warstwa ochronna zapewniają

stabilność mechaniczną i ochronę przed degradacją nadprzewodnika [23]. Jakość i funkcjonalność urządzeń nadprzewodnikowych zależy od kilku kluczowych czynników: parametrów krytycznych użytego nadprzewodnika (takich jak temperatura krytyczna, prąd krytyczny i pole krytyczne), efektywności systemu chłodzenia oraz rozwoju technologii produkcji taśm. Wysoka temperatura krytyczna umożliwia pracę urządzeń w mniej wymagających warunkach kriogenicznych, co znacznie obniża koszty eksploatacji [24], [25]. Obecnie kilka wiodących firm na świecie zajmuje się produkcją taśm HTS 2G, co przyczynia się do ich coraz szerszego wdrażania w zastosowaniach komercyjnych. W artykule przedstawiono wyniki badań mikrostrukturalnych taśm HTS 2G pozwalające na identyfikację struktur i możliwość identyfikacji mikrodefektów, mogących w istotny sposób wpływać na trwałość taśm nadprzewodnikowych w warunkach eksploatacyjnych.

3. Badane materiały

Taśmy HTS II generacji (2G) z nadprzewodnikiem $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) o temperaturze krytycznej ok. 90 K [22] produkowane są w technologii cienkowarstwowej, w której na podłoże ze stali nierdzewnej (Hastelloy C-276) nanosi się warstwy buforowe (nakładane sekwencyjnie), zapewniające lepszą przyczepność warstwy nadprzewodnika oraz stanowiące barierę dyfuzyjną. Warstwy buforowe nanosi się w procesie zwanym IBAD (*ang. Ion Beam Assisted Deposition*). Budowę taśm HTS 2G firmy SuperPower przedstawiono na rys. 1. natomiast strukturę warstw buforowych w taśmach HTS 2G firmy SuperPower przedstawiono w tabeli 1 [26].



Rys. 1. Budowa taśmy HTS 2G wykonanej w technologii wielowarstwowej

Tabela 1. Struktura warstw buforowych w taśmach HTS 2G

Warstwy buforowe	Grubość warstwy
alumina	~80nm
yttria YSZ	~7nm
IBAD MgO	~10nm
Homo-epi MgO	~20nm
LMO (LaMnO_3)	~30nm

Taśm HTS 2G CF (Cable Formulation) produkowane są z dwoma grubościami warstwy Hastelloy - 50 μm - polecane są przez producenta do pracy w niskich polach magnetycznych i w temperaturze 77

K [27] oraz 100 μm oznaczane jako FCL (Fault Current Limiter), charakteryzujące się wysoką rezystancją w stanie normalnym i przeznaczone do NOPZ (SF12100-CF) [28], [27]. Hastelloy stanowi ponad 94% materiałów składowych taśm HTS i jest wykonany z niemagnetycznego stopu o dużej rezystywności o składzie: Ni 57%, Mo 15%, Cr 15,5%, Fe 5,5%, W 4%, Co 2,5%. Hastelloy charakteryzuje się małymi stratami przy przepływie prądu roboczego oraz dobrymi właściwościami mechanicznymi wpływającymi na poprawę elastyczności nadprzewodnika i jego stabilizację termiczną [26]. Warstwa nadprzewodnika o grubości ok. 1 μm wykonana jest z YBCO (czasami stosuje się zamiast itru pierwiastki ziem rzadkich ((RE)BCO). Proces nanoszenia prekursora nadprzewodnika na taśmę odbywa się za pomocą systemu chemicznego osadzania z fazy gazowej związków metaloorganicznych (MOCVD, *ang. metalorganic chemical vapour deposition*) [23]. Ze względu na niską odporność taśm na odkształcenia mechaniczne (gięcie, skręcanie) przechowuje się je na specjalnych szpulach (rys. 2). W tabeli 2 przedstawiono parametry badanych taśm HTS.

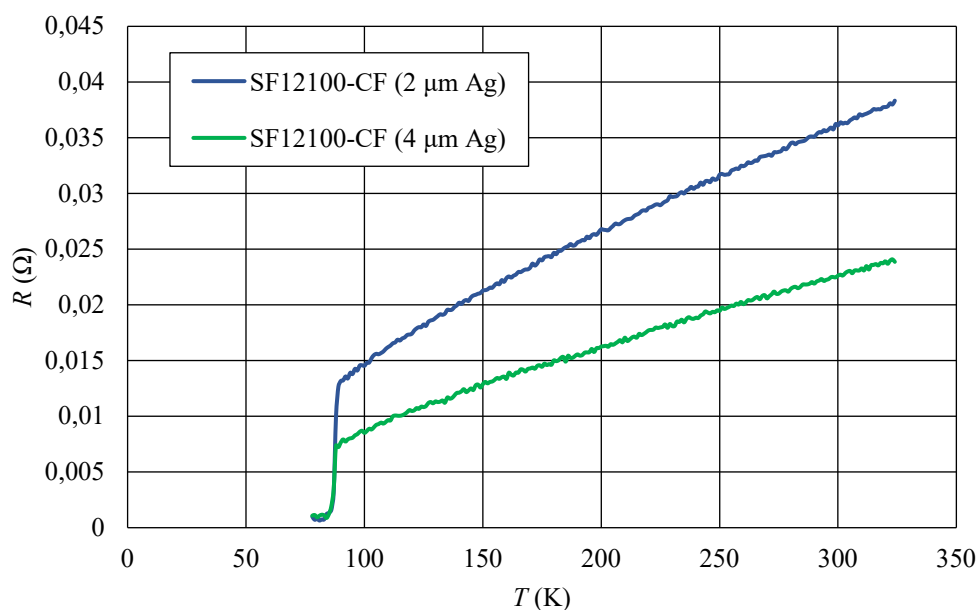


Rys. 2. Szpule taśm nadprzewodnikowych HTS 2G – zasoby własne Laboratorium Nadprzewodnictwa i Inżynierii Materiałowej, Instytutu Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki Uniwersytetu Zielonogórskiego

Tabela 2. Parametry taśm HTS 2G

Taśma HTS	SF12100-CF	SF12100-CF
grubość warstwy srebra (deklarowana przez producenta)	2 μm	4 μm
szerokość	12 mm	12 mm
grubość	0,105 mm	0,105 mm
grubość podłoża (Hastelloy)	0,1 mm	0,1 mm
minimalny prąd krytyczny $I_{C(77\text{K})}$	281 A	312 A
temperatura krytyczna nadprzewodnika YBCO T_C	90 K	90 K

W stanie nadprzewodzącym prąd płynie przez warstwę nadprzewodnika a rezystancja taśmy jest praktycznie równa zero. W temperaturze krytycznej T_C taśma przechodzi w stan rezystywny w sposób skokowy, natomiast jej rezystancja zależy od budowy taśmy (grubości warstw srebra i Hastelloy). Na rys. 3 przedstawiono charakterystyki $R(T)$ dla badanych taśm HTS 2G.



Rys. 3. Charakterystyki $R(T)$ taśm HTS 2G

4. Zakres badań i przygotowanie próbek taśm HTS

Przeprowadzone badania mikrostrukturalne miały na celu obserwację struktur warstwowych w próbkach taśm HTS 2G. W tym celu wykonano zdjęcia i pomiary z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (FE-SEM). Analizę składu chemicznego wykonano przy użyciu INCA OXFORD wykorzystaniu spektroskopii promieniowania X z dyspersją energii (ang. Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)). W badaniach uwzględniono ocenę struktury warstw srebra, nadprzewodnika, podłoża Hastelloy oraz warstw buforowych. Wyznaczono średnie grubości warstw, oceniono ich ciągłość oraz anomalie w wyglądzie, mogące wskazywać na występowanie defektów lub mikrouszkodzeń. Przygotowano próbki zainkludowane w fenolowej żywicy przewodzącej, pozwalające na ocenę przekroju poprzecznego badanych taśm HTS (rys. 4.).



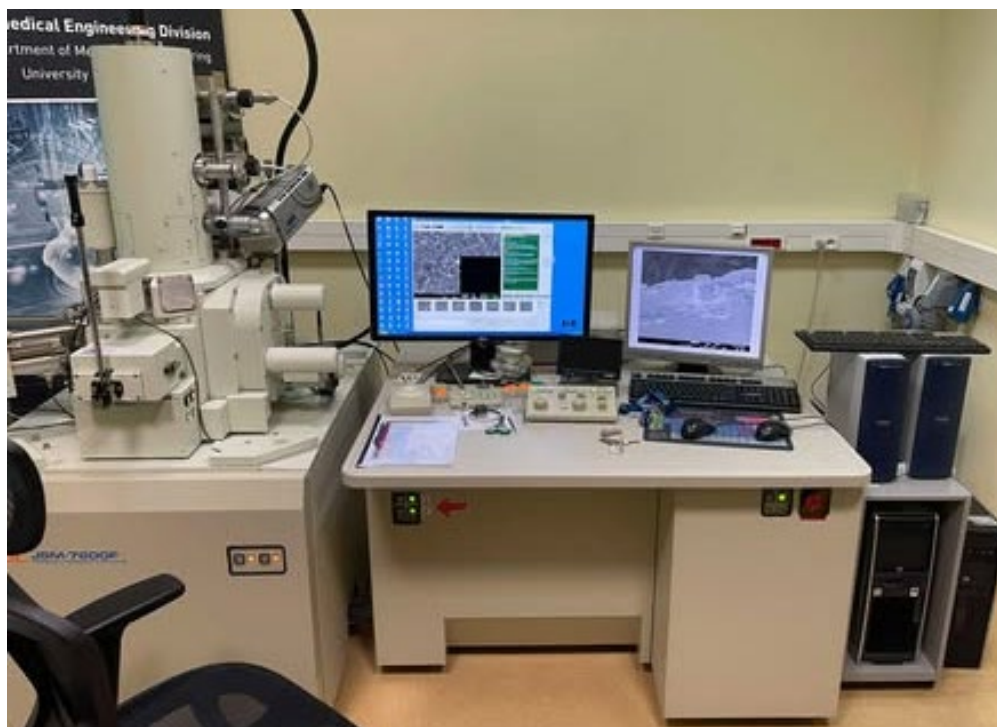
Rys. 4. Próbki przekroju poprzecznego taśm HTS umieszczone w przewodzącej żywicy fenolowej

5. Metodologia badań

Stanowisko pomiarowe wyposażone w wysokiej klasy mikroskopem elektronowym JEOL 7600F z emisją polową umożliwiającą uzyskiwanie obrazów o bardzo wysokiej rozdzielczości i z dużym powiększeniem przedstawiono na rys. 5. Ponadto mikroskop wyposażony jest w spektrometr dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego, który umożliwia analizę punktową, liniową oraz mapping w celu określenia składu jakościowego i procentowego pierwiastków. System INCA umożliwia m.in. analizę składu chemicznego za pomocą spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS), co w połączeniu z funkcjami pomiarowymi mikroskopu pozwala na kompleksową charakterystykę badanych próbek. W kontekście wykonywania precyzyjnych pomiarów wymiarów, takich jak szerokość czy grubość badanych obiektów, JEOL 7600F posiada dedykowane oprogramowanie umożliwiające kalibrację obrazu oraz dokładne określanie rozmiarów struktur na poziomie nanometrycznym. Oprogramowanie to pozwala na nanoszenie wymiarów bezpośrednio na uzyskane obrazy, co jest kluczowe w analizach materiałowych i badaniach mikrostrukturalnych.

Podczas badań zastosowano następujące warunki pomiarowe:

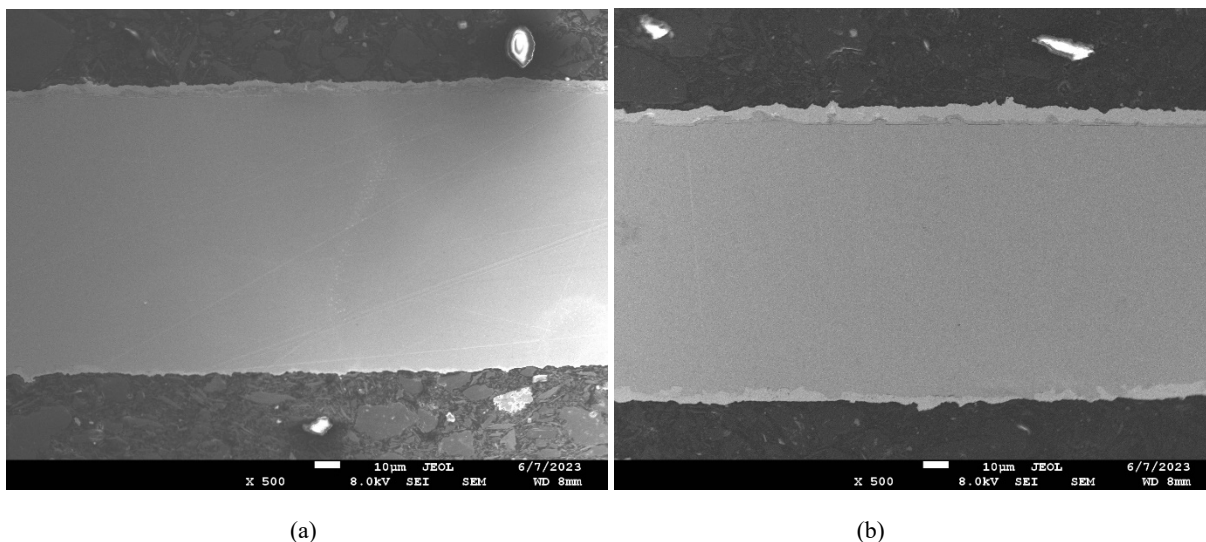
- natężenie prądu sondy skanującej 8 mA,
- napięcie przyspieszające wiązkę elektronów 7–8 kV.



Rys. 5. Stanowisko pomiarowe ze skaningowym mikroskopem elektronowym (zasoby Instytutu Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego)

6. Wyniki badań

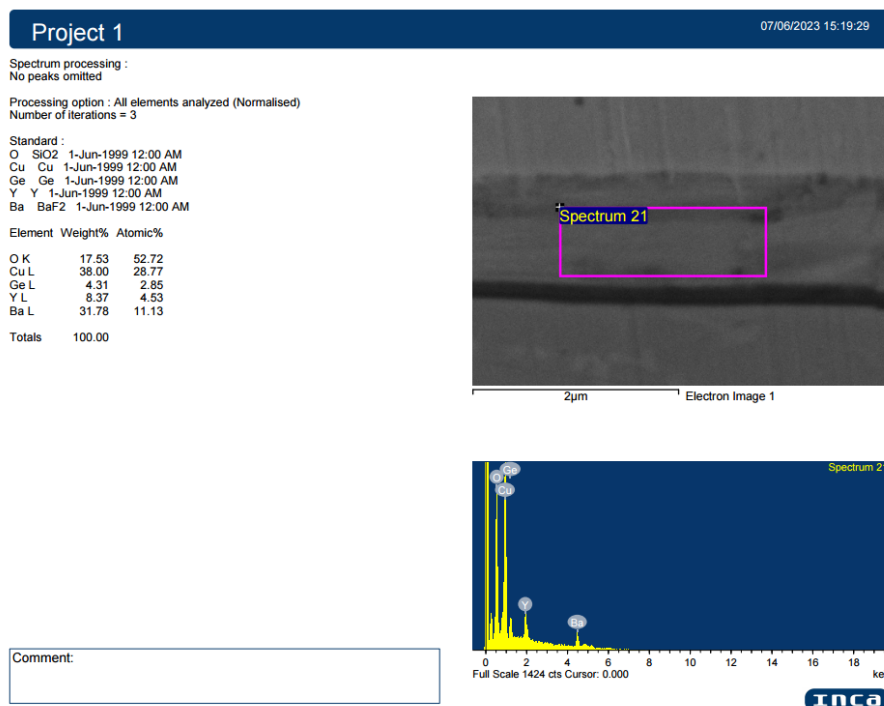
Na rys. 6. przedstawione zostały zdjęcia przekroju poprzecznego badanych taśm HTS o dwóch grubościach warstwy srebra – 2 μm i 4 μm (deklarowanych przez producenta w specyfikacji produktu) w powiększeniu 500-krotnym. Widoczne są trzy zasadnicze warstwy przekroju – zewnętrzne warstwy o bardzo małej grubości i środkowa warstwa podłoża Hastelloy. W celu dokładnej identyfikacji warstw wykonano obrazy w powiększeniu: 500x, 5000x i 30 000x oraz analizę składu chemicznego wybranych obszarów.



Rys. 6. Zdjęcia przekroju poprzecznego taśm HTS a) taśma SF12100-CF z górną warstwą srebra o grubości 2 μm , b) taśma SF12100-CF z górną warstwą srebra o grubości 4 μm

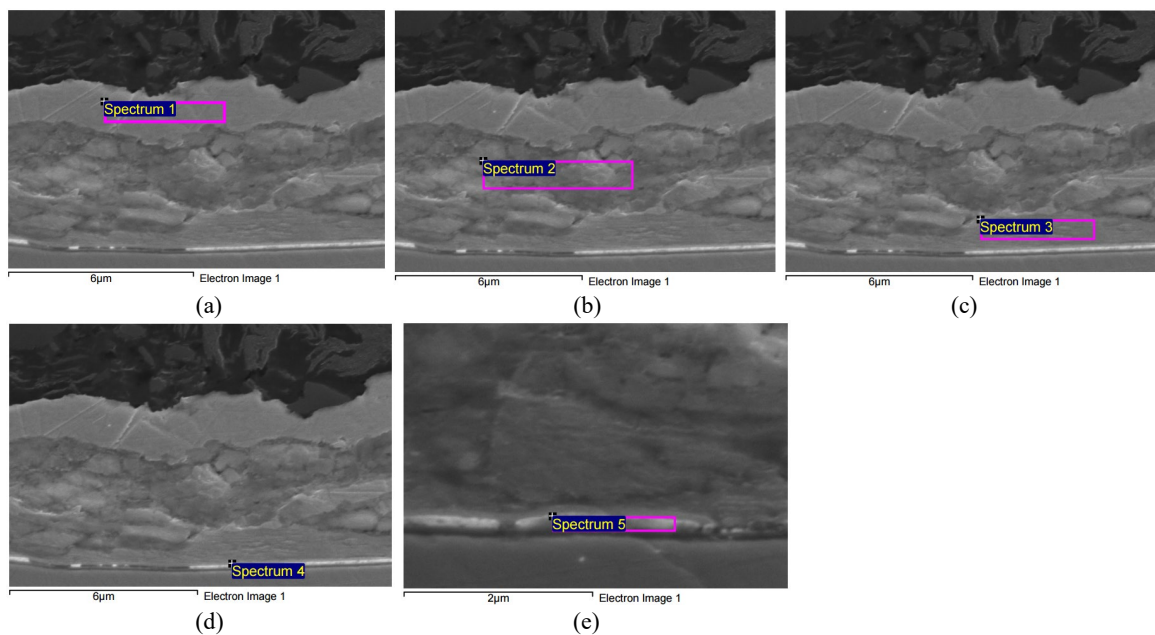
a) Identyfikacja warstw taśm HTS

Taśmy HTS cechują się dość dużą jednorodnością obserwowanych warstw, pozwalającą na ich identyfikację. Na rys. 7 przedstawiono wynik analizy składu chemicznego warstwy YBCO, wykonany dla bardzo jednorodnego fragmentu taśmy, który posłużył w dalszej analizie na identyfikację warstw nadprzewodnika.



Rys. 7. Analiza składu chemicznego warstwy YBCO, wykonana dla obszaru (spectrum 21)

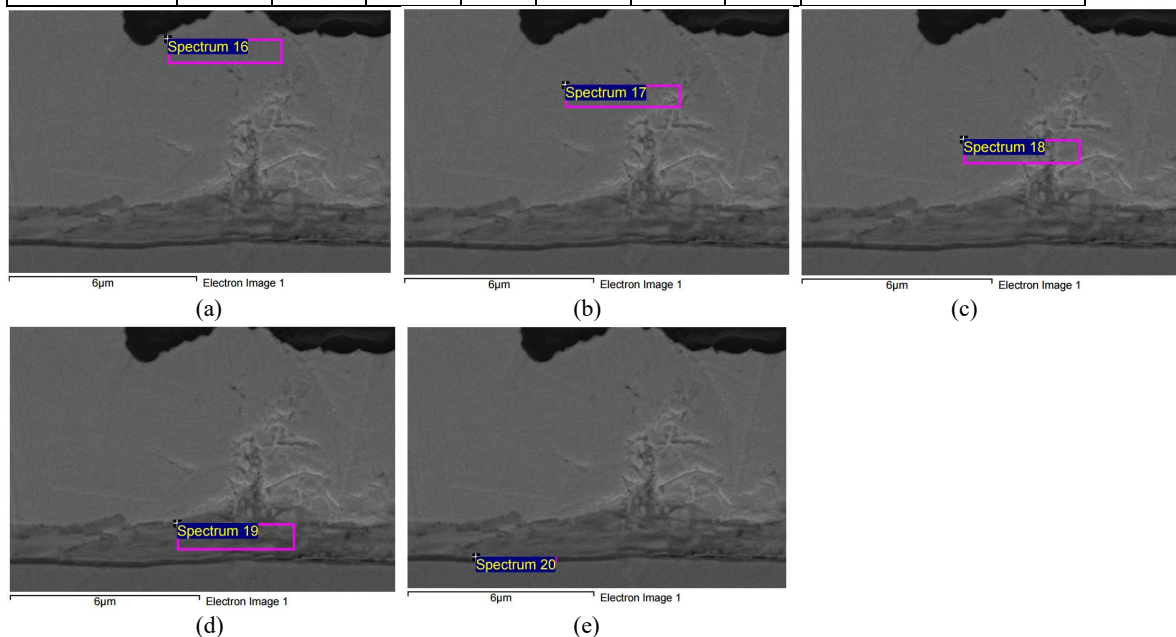
Obserwacja taśm HTS w różnych punktach przekroju poprzecznego pozwoliła na wyodrębnienie obszarów, w których identyfikacja warstw była utrudniona ze względu na niejednorodny wygląd oraz na zmienne grubości warstw. W celu ich identyfikacji przeprowadzono analizę składu chemicznego dla obszarów (spectrum) oznaczonych na rys. 8 i rys. 9 kolorem fioletowym, natomiast uzyskane wyniki procentowego składu chemicznego oraz identyfikację warstwy zamieszczono w tabelach 3 i 4.



Rys. 8. Zdjęcia przekroju poprzecznego taśmy HTS SF12100-CF z warstwą srebra o grubości 2 μm Ag - górna warstwa taśmy - z zaznaczonymi obszarami, dla których wykonano analizę składu chemicznego

Tabela 3. Zestawienie wyników składu chemicznego dla obszarów (spectrum 1-5) i identyfikacja warstwy

Obszar	O (%)	Ag (%)	Cu (%)	Ge (%)	Y (%)	Ba (%)	Mg (%)	Zidentyfikowana warstwa
Spectrum 1	2,46	97,54						górna warstwa srebra
Spectrum 2	9,43	65,75	18,49	2,15	4,19			górna warstwa srebra, YBCO
Spectrum 3	18,01		36,79	5,62	9,89	29,69		YBCO
Spectrum 4	17,39		37,50	4,93	10,41	29,77		YBCO
Spectrum 5	23,97		41,64	5,44	10,03	16,65	2,28	YBCO, warstwy buforowe



Rys. 9. Zdjęcia przekroju poprzecznego taśmy HTS SF12100-CF z warstwą srebra o grubości 4 μm Ag - górna warstwa taśmy - z zaznaczonymi obszarami, dla których wykonano analizę składu chemicznego

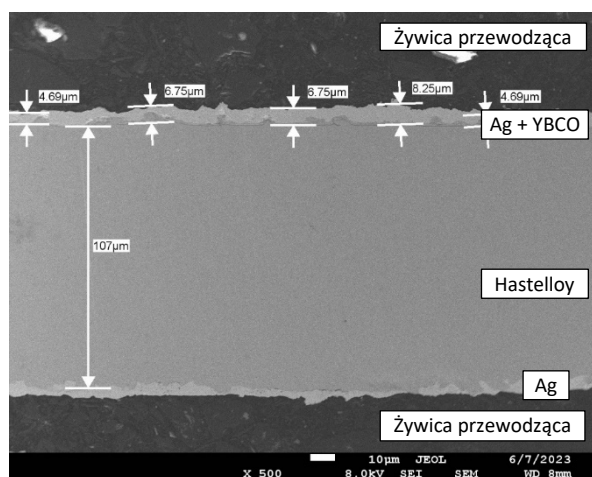
Tabela 4. Zestawienie wyników składu chemicznego dla obszarów (spectrum 16-20) i identyfikacja warstwy

Obszar	O (%)	Ag (%)	Cu (%)	Ge (%)	Y (%)	Ba (%)	Mg (%)	Al (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Zidentyfikowana warstwa
Spectrum 16		100										górna warstwa srebra
Spectrum 17		100										górna warstwa srebra
Spectrum 18	1,80	96,25	1,95									górna warstwa srebra
Spectrum 19	22,90	2,35	35,52	4,58	7,99	26,65						YBCO
Spectrum 20	15,36						2,07	9,42	12,77	49,03	11,35	warstwy buforowe, Hastelloy

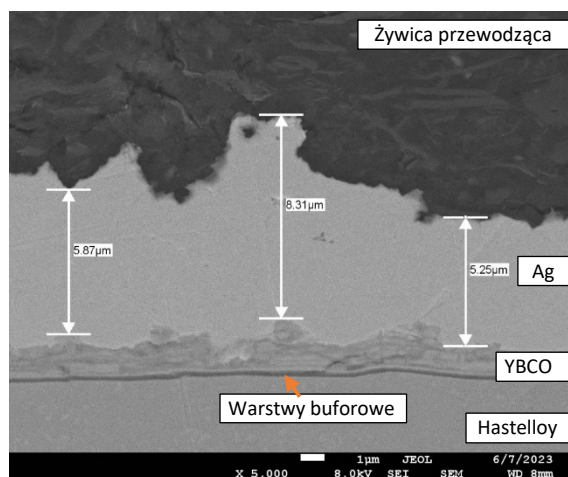
b) Pomiar szerokości warstw taśm HTS

Na rys. 10 przedstawiono obrazy taśmy HTS SF12100-CF (4 μm Ag) z zaznaczonymi grubościami widocznych warstw taśmy. W trakcie obrazowania taśm HTS wykonano pomiary ich grubości a uzyskane wyniki (dla obu taśm HTS) zestawiono w tabeli 5.

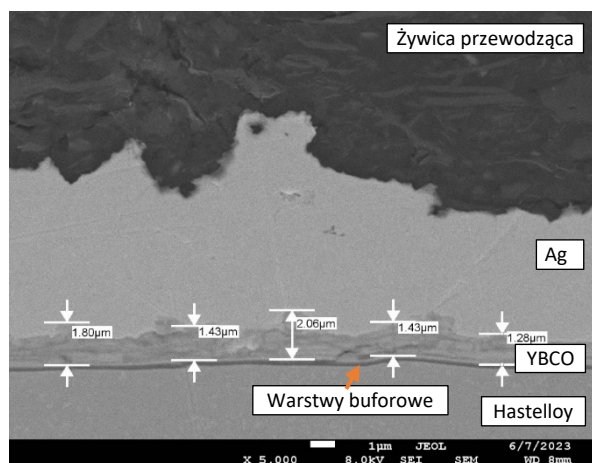
(a)



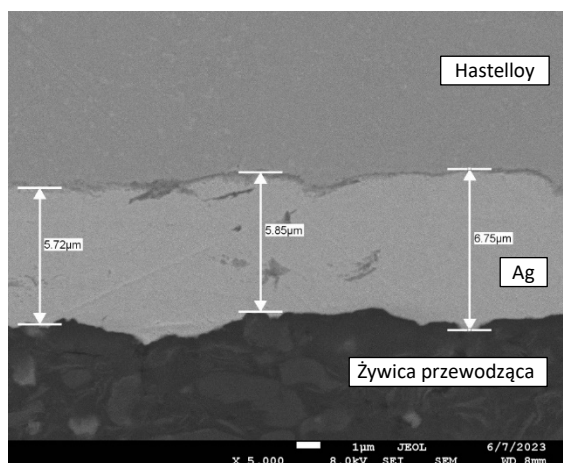
(b)



(c)



(d)



Rys. 10. Zdjęcia przekroju poprzecznego taśmy HTS SF12100-CF z warstwą srebra o grubości 4 μm a) z zaznaczonymi grubościami warstw, b) górna warstwa srebra, c) warstwa YBCO, d) dolna warstwa srebra

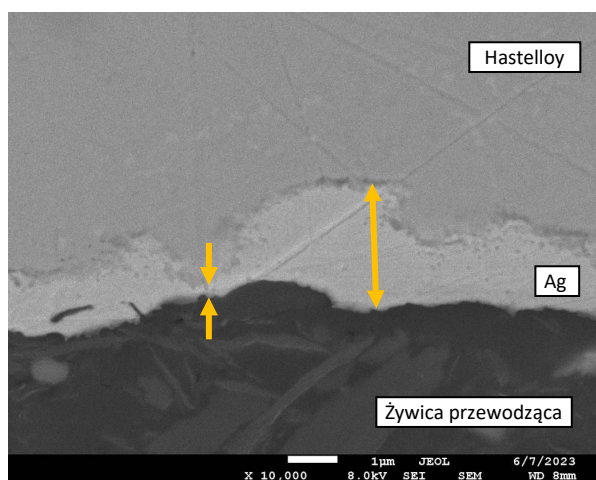
Tabela 5. Średnie grubości warstw w badanych taśmach HTS

Warstwa:	Średnie grubości warstw taśm HTS SF12100-CF	
	4 μm Ag	2 μm Ag
srebro (góra taśmy)	6,48 μm	2,33 μm
YBCO	1,60 μm	2,67 μm
Hastelloy	107,00 μm	107,00 μm
srebro (dół taśmy)	6,74 μm	1,38 μm

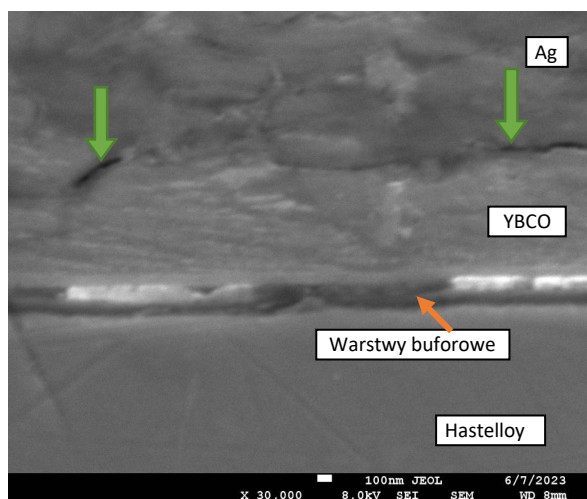
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że grubości warstw taśm HTS różnią się od podawanych w specyfikacjach produktów. Większe odstępstwa zaobserwowano dla taśmy HTS z 4 μm Ag, dla której grubość zarówno górnej jak i dolnej warstwy srebra były większe. Ponadto zaobserwowano miejscowo dużą niejednorodność w grubościach tych warstw w próbkach.

c) Identyfikacja mikrouszkodzeń

W wyniku przeprowadzonej analizy zdjęć mikroskopowych zauważono obszary o odmiennym wyglądzie warstw taśm HTS. Zmiany te dotyczyły dysproporcji w grubościach warstw srebra – zarówno dla górnej jak i dolnej warstwy, prawdopodobnej delaminacji warstw Ag i YBCO, nieciągłości warstw buforowych i zgrubień na warstwach podłoża. Rys. 11 i rys. 12 przedstawiają zmiany zaobserwowane w próbkach taśm HTS z 2 μm Ag. Na rys. 11 różnice w szorstkości dolnej warstwy srebra oznaczono żółtymi strzałkami. Grubość warstwy srebra wpływa na wartość rezystancji taśmy po wyjściu ze stanu nadprzewodnictwa. Miejsca o najcieńszej grubości srebra mogą być narażone na uszkodzenie ciągłości warstwy. Na rys. 12, wykonanym w powiększeniu 30 000x, widoczna jest szczelina na granicy Ag-YBCO, zaznaczona zielonymi strzałkami, mogąca świadczyć o postępującym procesie delaminacji tych warstw.

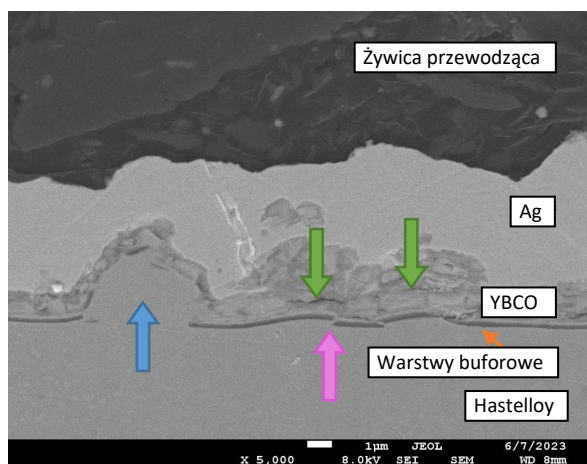


Rys. 11. Zdjęcie dolnej warstwy taśmy HTS (2 μm Ag) z zaznaczonymi dysproporcjami w szerokości dolnej warstwy srebra



Rys. 12. Zdjęcie taśmy HTS (2 μm) z zaznaczonymi szczelinami pomiędzy warstwami Ag i YBCO

Na rys. 13, przedstawiającym fragment taśmy HTS z 4 μm Ag, zielonymi strzałkami oznaczono widoczne rozwarstwienie na granicy Ag-YBCO, pomarańczową strzałką przykładowe miejsce nieciągłości warstw buforowych oraz niebieską strzałką zgrubienie na warstwie podłoża Hastelloy, nad którym widoczne jest odkształcenie warstwy nadprzewodnika i miejscowy brak warstw buforowych.



Rys. 13. Zdjęcie taśmy HTS (4 μm) z zaznaczonymi defektami: niebieska strzałka – wypukłość na warstwie Hastelloy, zielone strzałki – szczeliny na granicy Ag i YBCO, fioletowa strzałka – nieciągłość warstw buforowych.

Przyczyn występowania mikrouszkodzeń można upatrywać w procesie produkcyjnym ale także część z uszkodzeń mogła powstać w wyniku oddziaływań mechanicznych. Dlatego bardzo istotna jest kontynuacja badań o charakterze jakościowym i ilościowym.

7. Wnioski

Badania mikrostrukturalne taśm HTS 2G dostarczają istotnych informacji na temat ich budowy, jednorodności oraz potencjalnych defektów. W wyniku przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że parametry taśm HTS dotyczące grubości ich warstw składowych różnią się od podawanych przez producenta. Badania przeprowadzone za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz spektroskopii EDS potwierdziły jednorodność warstw oraz możliwość identyfikacji poszczególnych struktur. Obserwacje wykazały jednak miejscowe anomalie w postaci zmiennych grubości warstw i defektów, co może mieć wpływ na właściwości elektryczne taśm. Defekty i mikrouszkodzenia takie jak dysproporcje w grubościach warstw srebra, pęknięcia na granicy warstw

Ag i YBCO, nieciągłości warstw buforowych, zgrubień na warstwie podłoża prowadzące do deformacji warstw sąsiednich mogą prowadzić do zmniejszenia trwałości taśm HTS w warunkach eksploatacyjnych. Wykryte mikrouszkodzenia wskazują na konieczność dalszej optymalizacji procesów produkcyjnych, zwiększających niezawodność i trwałość tych materiałów w zastosowaniach technologicznych.

Niniejsze badania zostały sfinansowane w całości przez Narodowe Centrum Nauki, nr grantu UMO-2024/53/B/ST8/01632"

Bibliografia

- [1] A. D. Aghamalijewa, „X-Ray Diagnostic Methods,” w 7. *INTERNATIONAL ANKARA MULTIDISCIPLINARY STUDIES CONGRESS*, Ankara, Turkey, ISBN - 978-625-8254-40-2, 2024.
- [2] Y. Yanagisawa, R. Piao, Y. Suetomi, T. Yamazaki, K. Yamagishi, T. Ueno, T. Takao, K. Ohki, T. Yamaguchi, T. Nagaishi, H. Kitaguchi, Y. Miyoshi, M. Yoshikawa, M. Hamada, K. Saito, K. Hachitani, Y. Ishii i H. Maeda, „Development of a persistent-mode NMR magnet with superconducting joints between high-temperature superconductors,” *Superconductor Science and Technology*, pp. 34(11):115006, DOI: 10.1088/1361-6668/ac2120, 2021.
- [3] Y. Yanagisawa, M. Hamada, K. Hashi i H. Maeda, „Review of recent developments in ultra-high field (UHF) NMR magnets in the Asia region,” *Superconductor Science and Technology*, pp. 35(4), DOI: 10.1088/1361-6668/ac5644, 2022.
- [4] E. D'Adamo, „La Cost-Benefit Analysis delle grandi infrastrutture: un riesame del Large Hadron Collider (LHC) del CERN,” *PRISMA Economia - Societa – Lavoro*, pp. DOI: 10.3280/PRI2019-001007, 2019.
- [5] „LUVATA,” [Online]. Available: <https://www.luvata.com>. [Data uzyskania dostępu: 17 2 2025].
- [6] G. De Marzi, L. Muzzi i P. J. Lee, „Superconducting Wires and Cables: Materials and Processing,” *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier*, pp. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.01917-2, 2016.
- [7] M. Stemmler, F. Merschel i M. Noe, „AmpaCity Project — World's First Superconducting Cable and Fault Current Limiter Installation in a German City Center,” w *Research, Fabrication and Applications of Bi-2223 HTS Wires*, 2016, p. DOI: 10.1142/9789814749268_0019.
- [8] S. Yadav, K. Bharati i V. Tewari, „Superconducting Fault Current Limiter-A Review,” *International Journal of Applied Engineering Research*, p. 14(2), 2019.
- [9] V. V. Rao i S. Kar, „Superconducting Fault Current Limiters - a Review,” *Indian Journal of Cryogenics*, pp. 36, 1-4, National Institute of Technology Rourkela 2011.
- [10] M. C. Nagarathna, H. Vijay Murthy i R. Shashikumar, „A Review on Super Conducting Fault Current Limiter (SFCL) in Power System,” *International Journal of Engineering Research and General Science*, p. 3(2):2, 2015.

- [11] T. Janowski, H. D. Stryczewska, S. Kozak, H. Malinowski, G. Wojtasiewicz, P. Surdacki, B. Kondratowicz-Kucewicz i J. Kozak, *Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu*, Lublin: Wydawnictwo Drukarnia LIBER, 2002.
- [12] T. Janowski, H. D. Stryczewska, A. Wac-Włodarczyk i i inni, *Technologie nadprzewodnikowe i plazmowe w energetyce*, Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 2009.
- [13] S.-C. Ko, T.-H. Han i S.-H. Lim, „Power consumption and cumulative energy of bridge type SFCL with simultaneous quench,” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, pp. 592(15):1354001, DOI: 10.1016/j.physc.2021.1354001, 2022.
- [14] H.-Y. Lee; , M. Asif, K.-H. Park i B.-W. Lee, „Assessment of appropriate SFCL type considering DC fault interruption in full bridge modular multilevel converter HVDC system,” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, pp. 563, 1-6, DOI: 10.1016/j.physc.2019.04.006, 2019.
- [15] P. Kacejko i J. Machowski, *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2002.
- [16] Y. Tang, Y. Xu, S. Yan, F. Feng i G. Yan, „Superconducting Wires and Tapes for SMES,” w *Advances in Energy Storage*, 2021, p. DOI: 10.1002/9781119239390.ch9.
- [17] Y. Xu, L. Ren, J. Shi i Y. Tang, „Key Technologies of Superconducting Magnets for SMES,” w *Advances in Energy Storage*, 2021, p. DOI: 10.1002/9781119239390.ch7.
- [18] A. Anand, A. S. Gour, T. S. Datta i V. V. Rao, „Energy Storage with Superconducting Magnets: Low-Temperature Applications,” w *Low-Temperature Technologies and Applications [Working Title]*, 2024, p. DOI: 10.5772/intechopen.1008780.
- [19] T. Janowski, L. Jaroszyński i G. Wojtasiewicz, „Technologie i ekonomiczne uwarunkowania budowy transformatorów nadprzewodnikowych,” *Przegląd Elektrotechniczny*, p. nr 9, 2013.
- [20] J. Lee, M. Park i I. Yu, „A Study on the Modeling of Superconducting Fault Current Limiters Using EMTDC,” *IFAC Proceedings Volumes*, pp. 36(20):899-904, DOI: 10.1016/S1474-6670(17)34587-1, 2003.
- [21] D. Shireesha, M. C. S. Naik i B. Anusha, „Improvement of Microgrid Protection Using SFCL,” *Iconic Research and Engineering Journals*, p. 1(4), 2017.
- [22] P. Surdacki, „Analiza parametrów zanikania nadprzewodnictwa w przewodach nadprzewodnikowych YBCO i MgB₂,” *Przegląd elektrotechniczny*, pp. R. 90, nr 2/2014, 2014.
- [23] D. W. Hazelton, „2G HTS Wire Development at SuperPower,” w *WAMHTS-4 -Barcelona*, Hiszpania, 2017.
- [24] P. Pęczkowski, P. Szterner i Z. Jaegermann, „Ceramiczne nadprzewodniki wysokotemperaturowe - podział i zastosowania,” *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, p. nr 27, październik-grudzień 2016.
- [25] B. C. J. Stankowski, *Nadprzewodnictwo*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1999.

- [26] X. Xiong, K. P. Lenseth, J. L. Reeves, Y. Oiao, R. M. Schmidt, Y. Chen, Y. Li, Y. Xie i V. Selvamankam, „High Throughput Processing of Long-Length IBA MgO and Epi-Buffer Templates at SuperPower,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, pp. 17(2):3375-3378, DOI: 10.1109/TASC.2007.899450, 2007.
- [27] „2G HTS Wire Specification,” SuperPower, 2022. [Online]. Available: <https://www.superpower-inc.com/specification.aspx>. [Data uzyskania dostępu: 16 maja 2022].
- [28] SuperPower, „SuperPower 2G HTS Wire Specification,” [Online]. Available: <https://studylib.net/doc/18207918/2g-hts-wire---superpower>. [Data uzyskania dostępu: 2023].