

Technologia łączenia taśm HTS 2G w uzwojeniach nadprzewodnikowych urządzeń elektrycznych

Streszczenie. W nadprzewodnikowych urządzeniach elektrycznych takich jak elektromagnesy nadprzewodnikowe lub nadprzewodnikowe ograniczniki prądu wymagane jest wykonanie odpowiednich połączeń taśm nadprzewodnikowych HTS do przepustów prądowych i wewnątrz uzwojenia pomiędzy taśmami HTS. W artykule przedstawiono problemy występujące podczas łączenia taśm nadprzewodnikowych wysokotemperaturowych, opisano technologie wykonania takich połączeń specjalnie do tego celu zaprojektowanym i wykonanym urządzeniem.

Abstract. Superconducting electric devices such as superconducting magnets or superconducting fault current limiters require appropriate joints of HTS tapes to the current leads and splices inside winding between HTS tapes. The paper describes the soldering problems of high temperature superconducting tapes, and the technology of soldering of HTS tapes by using specially designed and manufactured device. (**Soldering technology of HTS 2G tapes in windings of superconducting devices**).

Słowa kluczowe: nadprzewodnictwo, taśma HTS, uzwojenia nadprzewodnikowe, lutowanie taśm nadprzewodnikowych.

Keywords: superconductivity, HTS tape, superconducting windings, soldering of superconducting tapes.

doi:10.12915/pe.2014.03.34

Wstęp

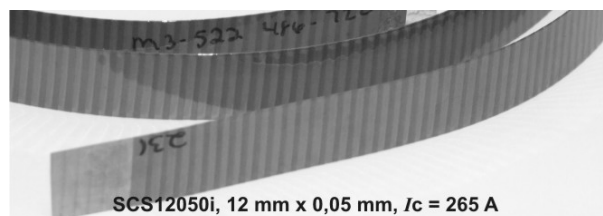
W urządzeniach elektrycznych wykonanych z taśm nadprzewodnikowych wysokotemperaturowych HTS (High Temperature Superconductor) pracujących w temperaturze kriogenicznej konieczne jest wykonanie minimum dwóch połączeń tj. początku i końca taśmy do przepustów prądowych lub bloków połączeniowych. Przepusty prądowe mają za zadanie doprowadzenie prądu ze źródła zasilania znajdującego się w temperaturze pokojowej do urządzenia nadprzewodnikowego umieszczonego w kriostacie w temperaturze kriogenicznej. Wadliwe połączenie taśmy HTS z przepustem prądowym jest częstą przyczyną awarii urządzenia. W miejscu połączenia zawsze występują straty wynikające z rezystancji połączeń, które mogą spowodować lokalne podgrzanie nadprzewodnika i wyjście ze stanu nadprzewodnictwa, co z kolei prowadzi do wydzielania dużej energii w tym miejscu i trwałe uszkodzenie taśmy nadprzewodnikowej. Producenci taśm HTS podają zalecenia związane z maksymalną temperaturą podczas lutowania taśm, dopuszczalnym czasem lutowania, minimalną zakładką w przypadku łączenia dwóch odcinków taśmy oraz minimalnego promienia gięcia taśmy. W przypadku taśm nadprzewodnikowych pierwszej generacji (HTS 1G) szczególnie w matrycy stalowej lutowanie stopem Pb60Sn40 standardową lutownicą z regulatorem temperatury pozwala na wykonanie odpowiedniego połączenia. Wykonanie połączenia taśm drugiej generacji (HTS 2G) jest znacznie trudniejsze.

Taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji

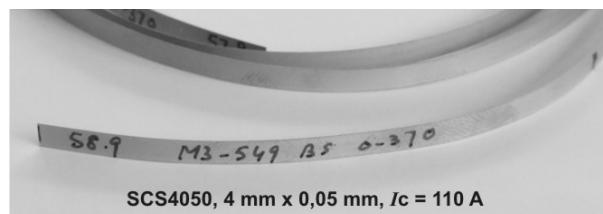
Taśmy HTS 2G produkowane są z myślą o zastosowaniach w konkretnych urządzeniach, dlatego producenci oferują różne rodzaje taśm do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu, transformatorów, czy elektromagnesów. Do budowy uzwojeń elektromagnesów przeznaczone są taśmy ze stabilizatorem miedziowym (Rys. 1) izolowane taśmą poliimidową lub bez izolacji (Rys. 2). Do budowy ograniczników prądu przeznaczone są taśmy bez stabilizatora miedzanego, w których warstwa nadprzewodnika o grubości 1 μm pokryta jest tylko cienką warstwą srebra o grubości 2 μm (Rys. 3).

Wszystkie rodzaje taśm HTS 2G dostępne są o szerokościach 2 mm (Rys. 4), 4 mm (Rys. 2) i 12 mm (Rys. 1). Taśmy nadprzewodnikowe szczególnie drugiej generacji należy łączyć przez lutowanie zgodnie z zaleceniami producenta aby nie straciły swoich właściwości. Firma

American Superconductor zaleca lutowanie taśm HTS 2G stopem Indalloy1 (52In48Sn) w temperaturze 135°C – 140°C lub Indalloy4 (100In) w temperaturze 165°C – 175°C nie dłużej niż 3 minuty [1].



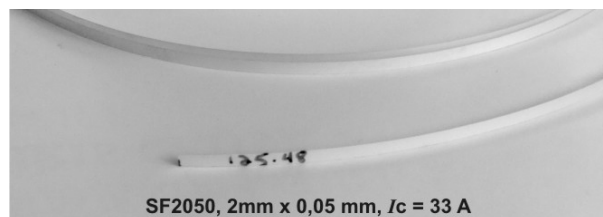
Rys.1. Izolowana taśma HTS 2G firmy SuperPower SCS12050i ze stabilizatorem miedziowym



Rys.2. Taśma HTS 2G firmy SuperPower SCS4050 ze stabilizatorem miedziowym

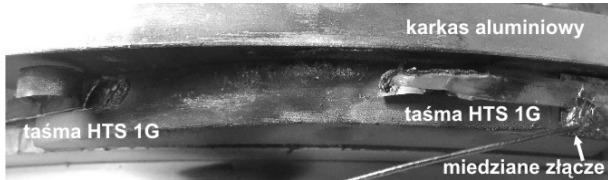


Rys.3. Rolka taśmy HTS 2G firmy SuperPower SF12050 (PTN IEI)



Rys.4. Taśma HTS 2G firmy SuperPower SF2050 bez stabilizatora miedzanego

SuperPower określa maksymalną temperaturę lutowania na 250°C w możliwie najkrótszym czasie oraz zakładkę 2,5 cm – 10 cm do wykonania prawidłowego połączenia [2]. Taśm HTS 2G przewidzianych do zastosowań w ogranicznikach prądu nie da się połączyć standardową lutownicą ponieważ cienka warstwa srebra natychmiast ulega uszkodzeniu. W Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Instytutu Elektrotechniki (PTN IEI) podczas badań taśm i prototypowych urządzeń nadprzewodnikowych wystąpiły uszkodzenia taśmy pierwszej i drugiej generacji. Uszkodzeniu uległa końcówka jednego z uzwojeń elektromagnesu nadprzewodnikowego chłodzonego kontaktowo w wyniku niedostatecznego odprowadzania ciepła z miedzianego złącza (Rys. 5). Połączenie zostało zmienione a uzwojenie naprawione.



Rys.5. Uszkodzona taśma HTS 1G na końcu uzwojenia elektromagnesu chłodzonego kontaktowo (13 K, $I = 170$ A)



Rys.6. Uszkodzona taśma HTS 2G SF12050 w temp. 77 K, przy prądzie zwarciovym szczytowym $i_p = 500$ A)

Podczas badań zwarciovych taśmy SF12050 ($I_c = 300$ A) wadliwe połączenie do płytki miedzianej spowodowane nierównomiernym dociskiem podczas lutowania standardową lutownicą spowodowało trwałe uszkodzenie taśmy (Rys. 6).

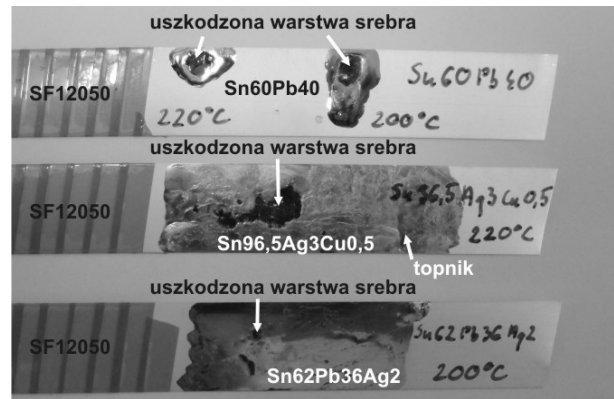


Rys.7. Uszkodzona taśma HTS 2G SF12050 w uzwojeniu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu [3]

Podczas badań modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu uszkodzeniu uległa taśma SF12050 przy połączeniu do bloku miedzianego (Rys. 7). Blok miedziany przykręcony do karkasu dwoma śrubami przemieścił się nieznacznie przy wyciąganiu ogranicznika z kąpeli ciekłego azotu, zamocowana sztywno końcówka taśmy przegięła się, co spowodowało uszkodzenie taśmy przy kolejnej próbie zwarciowej.

Podczas prób lutowania taśmy HTS 2G przy użyciu standardowej lutownicy cienka warstwa srebra 2 μ m ulegała uszkodzeniu w różnych temperaturach. Nawet delikatne przemieszczanie grota lutownicy powoduje usuwanie warstwy srebra z warstwy nadprzewodnika. Lutowanie taśm nadprzewodnikowych wymaga równomiernego grzania i docisku całej powierzchni złącza. Na rysunku 8 przedstawiono próby pokrycia trzema różnymi stopami do lutowania taśmy SF12050 od strony warstwy srebra w temperaturach 200°C i 220°C. Dla standardowego stopu Sn60Pb40 dotknięcie taśmy lutownicą powoduje

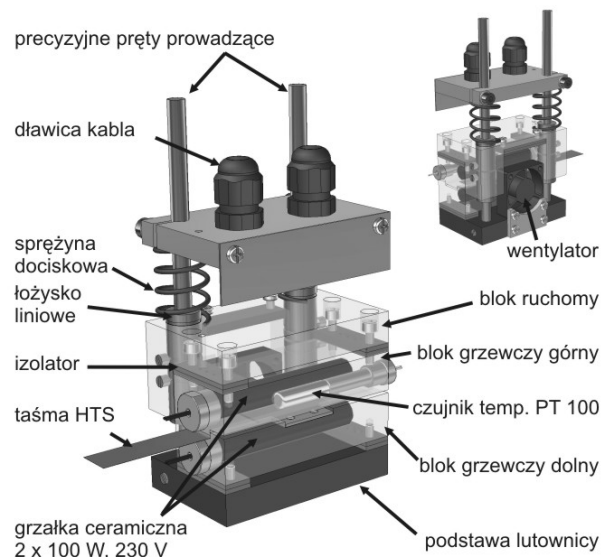
natychmiastowe uszkodzenie warstwy srebra. Najlepsze rezultaty otrzymano dla stopu Sn62Pb36Ag2 który miał najniższą temperaturę topnienia 179°C i pomimo uszkodzenia warstwy srebra rozprzodzał się najłatwiej, a uszkodzone obszary były najmniejsze.



Rys.8. Uszkodzenie termiczne taśmy typu SF12050 powstałe w wyniku lutowania taśmy nadprzewodnikowej standardową lutownicą z regulatorem temperatury (PTN IEI)

Stacja lutująca taśm nadprzewodnikowych

Lutowanie taśm nadprzewodnikowych musi być wykonywane z pełną kontrolą temperatury. Podczas lutowania należy używać możliwie najniższej temperatury lutowania i możliwie najkrótszego czasu do wykonania prawidłowego połączenia lutowanego.



Rys.9. Lutownica taśm nadprzewodnikowych – model 3D

Na rysunkach 9-11 przedstawiono zaprojektowaną i wykonaną w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych IEI stację lutującą służącą do wykonywania połączeń lutowanych taśm nadprzewodnikowych pierwszej i drugiej generacji. Stacja lutująca składa się z lutownicy oraz stacji bazowej z regulatorem temperatury. Lutownica umożliwia lutowanie taśm nadprzewodnikowych o szerokościach do 12 mm i zakładce do 70 mm oraz wykonywanie połączeń lutowanych taśm nadprzewodnikowej z miedzianymi doprowadzeniami prądowymi. Lutownica składa się z dwóch aluminiowych bloków grzewczych z umieszczonymi wewnątrz grzałkami ceramicznymi o mocy 100 W każda. W górnym aluminiowym bloku grzewczym umieszczono sondę termiczną typu PT-100, której zadaniem jest bieżący pomiar temperatury bloków grzewczych. Dolny blok

grzewczy ma wykonany rowek o szerokości 12,5 mm, dzięki czemu możliwe jest precyzyjne równoległe ułożenie lutowanych taśm nadprzewodnikowych. Górny blok grzewczy z wypustem jest zamocowany do aluminiowego bloku ruchomego poprzez izolujące termicznie podkładki. Blok ruchomy ma możliwość ruchu w pionie i przesuwany jest wzdłuż precyzyjnych prętów prowadzących na czterech łożyskach liniowych. Łożyska liniowe zamontowane są w bloku w dwóch równoległych otworach, zapewniając równomierny docisk bloków grzewczych do siebie. Siła docisku boków grzewczych może być regulowana poprzez regulację położenia górnej płytki aluminiowej. Z tyłu lutownicy umieszczony jest wentylator chłodzący, który załączany automatycznie przyspiesza proces chłodzenia bloków grzewczych po wykonaniu połączenia lutowanego. Praca lutownicy jest sterowana przez regulator temperatury oraz układ przekazników umieszczony w stacji bazowej.



Rys.10. Lutownica taśm nadprzewodnikowych

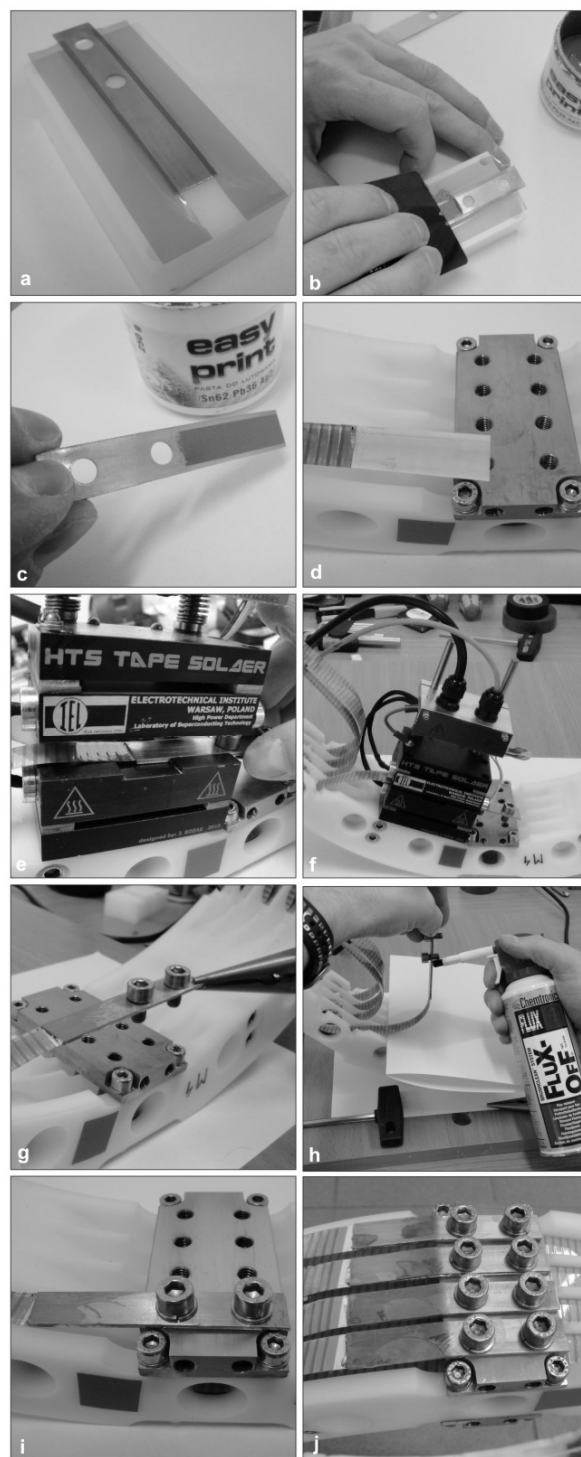


Rys.11. Stacja lutująca taśm nadprzewodnikowych (PTN IEI)

Proces wykonania połączenia taśmą HTS 2G z końcówką miedzianą

Proces wykonywania połączenia lutowanego taśmy nadprzewodnikowej 2G SF12050 firmy SuperPower z miedzianymi doprowadzeniami prądowymi przedstawiono na rysunku 12. Końcówka miedziana wykonana z blaszki o grubości 0,8 mm przyklejona jest taśmą samoprzylepną do bloku z plastiku (a), pasta do lutowania Easy Print Sn62Pb36Ag2 ($T_{\text{topnienia}} = 179^{\circ}\text{C}$) nakładana jest na końcówkę miedzianą plastikową kartą (b), grubość taśmy z klejem (0,06 mm) decyduje o grubości nakładanej warstwy pasty. Po odklejeniu taśmy od końcówki miedzianej (c), na drugą końcówkę nakładana jest pasta w identyczny sposób. Z taśmy nadprzewodnikowej zdjęta jest izolacja na odpowiedniej długości (d). W lutownicy umieszczone są dwie miedziane końcówki pokryte równomiernie pastą oraz taśma HTS 2G pomiędzy nimi (e). Lutownica jest zamykana i włączana (f). Po ochłodzeniu gotowe połączenie taśmy HTS 2G z końcówkami miedzianymi wyciągnięte jest z lutownicy (g), a następnie oczyszczone z resztek topnika (h). Końcówka przykręcana jest do miedzianego bloku

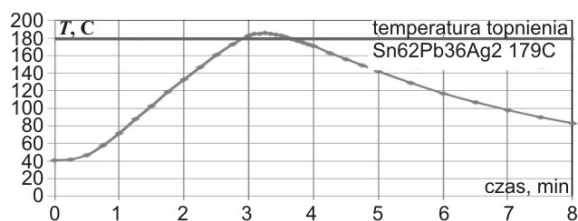
połączeniowego (i). Rysunek 12 (j) przedstawia cztery połączenia lutowane wykonane podczas montażu uzwojenia nadprzewodnikowego ogranicznika prądu.



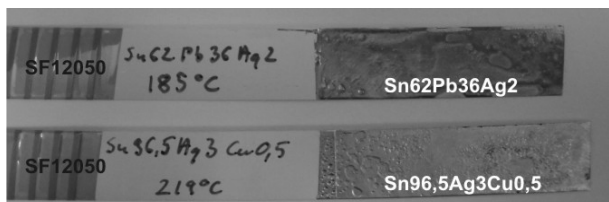
Rys.12. Etapy wykonywania połączenia lutowanego taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji SF12050 firmy SuperPower z miedzianymi doprowadzeniami prądowymi (PTN IEI) [4]

Proces wykonania połączenia odcinków taśmy HTS 2G

Przebieg procesu lutowania dla taśm SF12050 składa się z trzech faz (Rys. 13). W pierwszej fazie bloki grzewcze podgrzewane są (około 3 minuty) do temperatury topnienia pasty lutowniczej Sn62Pb36Ag2 do 179°C , przez kolejne 45 sekund temperatura bloków grzewczych rośnie do 185°C , a następnie grzanie jest wyłączone a bloki grzewcze chłodzone są wentylatorkiem.

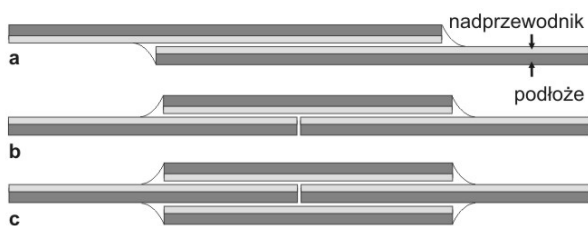


Rys.13. Przebieg temperatury podczas procesu lutowania taśm nadprzewodnikowych w funkcji czasu

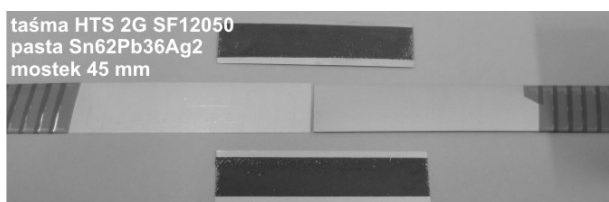


Rys.14. Taśma HTS 2G typ SF12050 pokryta stopem Sn62Pb36Ag2 w temperaturze 185°C oraz pokryta stopem Sn96,5Ag3Cu0,5 w temperaturze 219°C

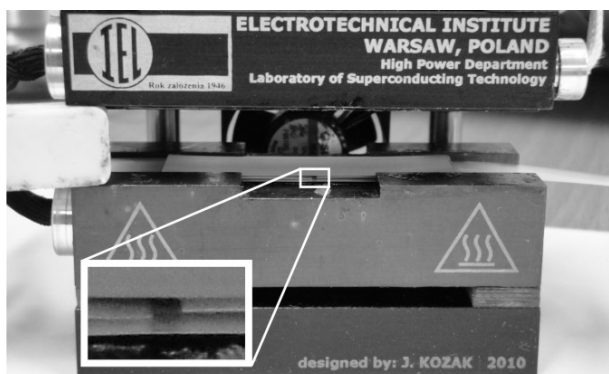
Podczas próby rozproszania stopu na taśmie (Rys. 14) w lutownicy udało się to wykonać nawet dla stopu Sn96,5Ag3Cu0,5 ($T_{\text{topnienia}} = 217^{\circ}\text{C}$) w temperaturze 219°C bez uszkodzenia warstwy srebra. Dla taśmy SF12050 przeprowadzono próbę łączenia trzema sposobami. Pierwszy to łączenie taśm warstwami srebra ku sobie, drugi zastosowanie mostka i trzeci z dwoma mostkami.



Rys.15. Sposoby łączenia taśm nadprzewodnikowych

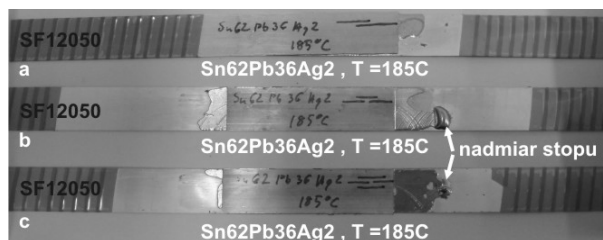


Rys.16. Przygotowanie taśmy HTS 2G do połączenia



Rys.17. Ułożenie taśm HTS 2G w lutownicy (typ c)

Rysunki 15-17 przedstawiają dwie przygotowane do łączenia taśmy SF12050 oraz dwa mostki z tej samej taśmy o długości 45 mm z naniesioną warstwą pasty do lutowania. Podczas nanoszenia pasty do lutowania należy szczególną uwagę zwrócić na jej grubość, ponieważ wypływający stop zbiera się na taśmie i zastyga w formie kropeł (Rys. 18).



Rys.18. Widok połączonych taśm HTS 2G, a) na zakładkę, b) z mostkiem, c) z podwójnym mostkiem

Połączenie na zakładkę (typ a) wymaga odwrócenia taśmy warstwami nadprzewodnika ku sobie dla zmniejszenia rezystancji połączenia co nie zawsze jest możliwe, natomiast połączenie z jednym mostkiem (typ b) jest bardzo wrażliwe na uszkodzenia mechaniczne. Podczas gięcia, gdy mostek jest od wewnętrznej strony taśma odrywa się w miejscu styku łączonych taśm. W praktyce najlepiej sprawdziło się połączenie z dwoma mostkami szczególnie podczas łączenia taśm w procesie ich izolowania oraz podczas nawijania uzwojeń. Połączenie z dwoma mostkami (typ c) można wyginać w obie strony, bez obawy o uszkodzenie połączenia.

Wnioski

Połączenia wykonane zaprojektowaną i zbudowaną lutownicą sprawdziły się podczas badań laboratoryjnych przeprowadzonych w kąpeli ciekłego azotu dla kilku rodzajów taśm nadprzewodnikowych. Opracowaną lutownicą łączone były wyprowadzenia napięciowe i prądowe taśm HTS 2G na potrzeby prób zwarciovych wykonywanych dla odcinków taśm o długości 1 m i prądzie zwarciovym kilkakrotnie przekraczającym prąd krytyczny taśmy. Wykonane połączenia nawet w tak trudnych warunkach spełniały swoją rolę. Opracowane sposoby łączenia taśm nadprzewodnikowych i zbudowana specjalna do tego celu lutownica daje możliwość budowania urządzeń opartych na najnowszych taśmach nadprzewodnikowych drugiej generacji.

Niniejsza praca jest finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju nr umowy PBS1/A4/1/2012.

LITERATURA

- [1] Service Note SN002 Guidelines for Handling and Soldering Amperium™ Wire, www.amsc.com
- [2] SuperPower®2G HTS Wire Specifications, www.superpower-inc.com
- [3] Kozak J., Majka M., Janowski T., Kozak S., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B., Test and performance analysis of coreless inductive HTS fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 21, (2011), No. 3, 1303-1306
- [4] Kozak J., Majka M., Janowski T., Kozak S., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B., Design and Tests of Coreless Inductive Superconducting Fault Current Limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 22, (2012), No. 3, 5601804

Autorzy: dr inż. Janusz Kozak, E-mail: j.kozak@iel.waw.pl; dr inż. Michał Majka, E-mail: m.majka@iel.waw.pl; Instytut Elektrotechniki, Zakład Wielkich Mocy, Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa.