

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-14-0522**

Ultraľahký kompozitný supravodič na báze Mg, B, Ti a Al

Zodpovedný riešiteľ **Ing. Pavol Kováč, DrSc.**

Príjemca **Elektrotechnický ústav SAV**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Elektrotechnický ústav SAV

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

žiadne

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

- Balog, M., Krížik, P., Kováč, P., Hušek, I., Kopera, L., Rosová, A.: Supravodič na báze MgB₂ s plášťom na báze Al a spôsob jeho výroby. PP50037-2017.

- PCT/IB2018/053540, 19 May 2018, SUPRAVODIČ NA BÁZE MGB 2 S PLÁŠŤOM NA BÁZE AL A SPÔSOB JEHO VÝROBY, Patent: PCT/IB2018/ISA/220 – Development of MgB₂ wire with an aluminium stabilizer.

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

Výstupy projektu

2016:

[1] M. Kulich, P. Kováč, M. Hain, A. Rosová and E. Dobročka, High density and connectivity MgB₂ filament made by internal magnesium diffusion technique, Sup. Sci. and Technology 29 (2016) 035004

[2] P. Kováč, I. Hušek, T. Melišek, L. Kopera and M. Kulich, Fast creation of dense MgB₂ phase in wires made by IMD process, Sup. Sci. and Technology 29 (2016) 10LT01

[3] P. Kováč, I. Hušek, W. Pachla, T. Melišek, M. Kulich, A. Rosová and L. Kopera, Effect of cold isostatic pressing on the transport current of filamentary MgB₂ wire made by IMD, Sup. Sci. and Technology 29 (2016) 075004

[4] B. Brunner, M. Reissner, M. Kulich and P. Kováč, Magnetic studies of MgB₂ prepared by internal magnesium diffusion with various doping, IEEE Trans on Appl Sup (2016) Vol 26 No. 3 6201205

[5] P. Kováč, I. Hušek, T. Melišek, M. Kulich and L. Kopera, Bending strain tolerances of MgB₂ conductors, Sup. Sci. and Technology 29 (2016) 045002

[6] P. Kováč, I. Hušek, M. Kulich, J. Kováč, T. Melišek and L. Kopera, MgB₂ wires with Ti and NbTi barrier made by IMD process, Cryogenics 79 (2016) 74-78

[7] P. Kováč, I. Hušek, J. Kováč, T. Melišek, M. Kulich and L. Kopera, Filamentary MgB₂ wires with low AC losses, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, IEEE Trans on

[8] P. Kováč, Book chapter „Effects of mechanical load on J_c of MgB₂ wires,“ in World Scientific Series in Applications of Superconductivity and Related Phenomena: Volume 2, MgB₂ superconducting wires, Basics and applications”, ed. by R. Flukiger, World Scientific 2016, ISBN: 978-981-4725-58-3, p. 439-454.

[9] J. Kováč, Book chapter „AC losses in MgB₂ wires,“ in World Scientific Series in Applications of Superconductivity and Related Phenomena: Volume 2, MgB₂ superconducting wires, Basics and applications”, ed. by R. Flukiger, World Scientific Sept 2016, ISBN: 978-981-4725-58-3, p. 419.

2017:

[1] B. Brunner, P. Kováč, A. Rosová, M. Reissner and E. Dobročka, Properties of MgB₂ wires doped with BaZrO₃ nanopowder made by modified internal magnesium diffusion process, Sup Sci and Technology 30 (2017) 115003

[2] B. Brunner, P. Kováč, M. Reissner and E. Dobročka, Effect of Dy₂O₃ doping on superconductor formation and enhanced properties of MgB₂ wires made by modified internal magnesium diffusion method, Sup Sci and Technology 30 (2017) 25004

[3] A. Rosová, M. Kulich, P. Kováč, B. Brunner, J. Scheiter, W. Häßler, The effect of B powder on microstructure of MgB₂ filaments prepared by modified internal magnesium diffusion technique, Sup Sci and Technology 30 (2017) 055001

[4] P. Kováč, M. Kulich L. Kopera, T. Melišek: Behaviour of filamentary MgB₂ wires loaded and unloaded by tensile stress, Sup Sci and Technology 30 (2017) 065006

[5] I. Hušek, P. Kováč, T. Melišek, L. Kopera, A. Rosová and B. Szundiová Superconducting MgB₂ wires with Vanadium diffusion barrier, Sup Sci and Technology 30 (2017) 105008

[6] P. Kováč, M. Balog, I. Hušek, L. Kopera, P. Krížik, A. Rosová, J. Kováč, M. Kulich and M. Čaplovičová, Properties of Al–Al₂O₃ metal matrix composites aimed for low temperature applications, Cryogenics 87 (2017) 58-65.

[7] P. Kováč, I. Hušek, T. Melišek, M. Kulich, A. Rosová J. Kováč, M. Balog, L. Kopera, and P. Krížik and L. Orovčík: Lightweight Al stabilized MgB₂ conductor made by IMD process, Sup Sci and Technology 30 (2017) 115001

[8] L. Kopera, P. Kováč, M. Kulich T. Melišek, M. Rindfleisch and I. Hušek: Critical currents of Rutherford MgB₂ cables wires compacted by two-axial rolling, Sup Sci and Technology 30 (2017) 015002

2018:

[1] P. Kováč, I. Hušek, A. Rosová, M. Kulich, T. Melišek, L. Kopera, J. Kováč, M. Balog and P. Krížik: Ultralight superconducting wire based on Mg, B, Ti and Al, Scientific Reports 8 (2018) 11229

[2] P. Kováč, I. Hušek, M. Kulich, J. Kováč, T. Melišek, L. Kopera, N. Perez, W. Haessler, M. Balog, P. Krížik D. Berek, MgB₂ wires with Al-Al₂O₃ sheath of variable purity and Al₂O₃ content, Sup Sci and Technology 31 (2018) 085003

[3] P. Kováč, I. Hušek, T. Melišek, M. Kulich, J. Kováč, L. Kopera and W. Pachla, Properties of multicore MgB₂ wire with Ti barrier and reinforced Al sheath, Sup Sci and Technology 31 (2018) 095006

[4] M. Balog, A. Rosová, L. Orovčík, B. Szundiova, P. Krížik, P. Svec Jr., M. Kulich, L. Kopera, P. Kováč, I. Hušek, A. M. Hassan, The effect of annealing at 595 – 655 °C on the microstructure, mechanical and electrical properties of HITEMAL, thermally stable and lightweight Al+Al₂O₃ material for outer sheath of MgB₂ superconductor wire, Materials and Design 157 (2018) 12-23

[5] Balog M, Kováč P, Krížik P, Rosová A, Orovčík L, Kulich M, Hušek I, Kopera L, Švec P, Powder metallurgy fabricated in-situ Al-Al₂O₃ composite (HITEMAL) as a sheath material of MgB₂ based superconductive wire, 2018 World Congress on Powder Metallurgy (2018) p. 974

[6] A. Rosová, I. Hušek, M. Kulich, T. Melišek, P. Kováč, E. Dobročka, L. Kopera, J. Scheiter, W. Häßler Microstructure of undoped and C-doped MgB₂ wires prepared by internal magnesium technique using different B powders, J of All and Compounds 764 (2018) 437–445

[7] P. Kováč, L. Kopera, T. Melišek, M. Hain, J. Kováč, M. Kulich, I. Hušek, Rutherford cable made of IMD MgB₂ wires sheathed with Al-Al₂O₃ particulate metal matrix composite, Sup Sci and Technology 31 (2018) 015015

[8] A Cubero, E Martínez, R. Navarro, P. Kováč, L. Kopera and M. Rindfleisch, Quench

dynamics in MgB₂ Rutherford cables, Sup Sci and Technology 31 (2018) 045009

[9] J. Kováč, M. Kulich, L. Kopera and P. Kováč, AC losses of Rutherford MgB₂ cables made by PIT and IMD process, Sup Sci and Technology 31 (2018) 125014

Konferencie – 2018:

[10] P. Kováč, I. Hušek, T. Melišek, L. Kopera, J. Kováč, M. Kulich, A. Rosová, M. Balog and P. Krížik, Towards the ultra-lightweight superconductor based on Mg, Ti and Al, Sept 3 – 7, ICEC/ICMC2018, Oxford UK.

[11] P. Kováč, I. Hušek, T. Melišek, L. Kopera, J. Kováč, M. Kulich, A. Rosová, M. Balog and P. Krížik, The lightest superconducting wire based on Mg, B, Ti and Al, Sept 26 -28, MSE2018 Darmstadt, Germany.

[12] Balog M, Kováč P, Krížik P, Rosová A, Orovčík L, Kulich M, Hušek I, Kopera L, Švec P, Powder metallurgy fabricated in-situ Al-Al₂O₃ composite (HITEMAL) as a sheath material of MgB₂ based superconductive wire, Sept 16-20, 2018 World Congress on Powder Metallurgy, Beijing China.

[13] Gelušiaková, B., Balog, M., Rosová, A., Orovčík, L., Krížik, P., Švec, Jr., P., Kováč, P., Hušek, I., Kulich, M., Kopera, L. Vplyv vysokoteplotného žihania na mikroštruktúru a vlastnosti tvrdeného hliníka, JEOL TEM Users Meeting 2018, Dec. 12, Praha

Patenty:

[14] Balog, M., Krížik, P., Kováč, P., Hušek, I., Kopera, L., Rosová, A.: Supravodič na báze MgB₂ s plášťom na báze Al a spôsob jeho výroby. PP50037-2017.

[15] PCT/IB2018/053540, 19 May 2018, SUPRAVODIČ NA BÁZE MGB 2 S PLÁŠŤOM NA BÁZE AL A SPÔSOB JEHO VÝROBY, Patent: PCT/IB2018/ISA/220 – Development of MgB₂ wire with an aluminium stabilizer.

Uplatnenie výsledkov projektu

Celková hmotnosť MgB₂/Ti/Al+Al₂O₃ supravodiča je v porovnaní s typickým MgB₂/Nb/Cu drôtom rovnakých rozmerov až 2.5 krát nižšia a rádovo nižšia v porovnaní s ostatnými vysoko-teplotnými a nízko-teplotnými supravodičmi. Tento fakt jasne naznačuje aj potenciálne využitie najľahšieho MgB₂/Ti/Al+Al₂O₃ supravodivého drôtu v porovnaní s ostatnými. Vyvinutý ultraľahký MgB₂ drôt spĺňa požiadavky na elektrické a mechanické vlastnosti pre využitie v systémoch vyžadujúcich aj nízku hmotnosť systému (veterné turbíny, výkonné elektrické motory a tiež kozmické aplikácie ako aktívne tienenie a impulzné pohony).

Použitie vonkajšieho obalu na báze Al poskytuje aj výhodu tenkých izolačných Al₂O₃ vrstiev (3-15 μm) pomocou elektrickej oxidácie. Takéto vrstvy majú vysokú tepelnú odolnosť pri žíhaní a tiež dobrú tepelnú vodivosť. To umožňuje konštruovať supravodivé cievky navinuté pred žíhaním („Wind & React“), t.j. vinutia malých priemerov a s vysokým plnením generujúce vysoké magnetické polia v minimalizovaných objemoch.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Dosiahli sme hlavný cieľ projektu - najľahší supravodič s vysokými prúdovými hustotami. Jeho realizácia sa podarila tým, že sme najľahšiu supravodivú fázu MgB₂ (s 2.55 gcm⁻³) použili v kombinácii s najľahšími možnými kovmi pre difúziu bariéru (Ti - 4.5 gcm⁻³) a pre tepelnú stabilizáciu HITEMAL (Al - 2.7 gcm⁻³).

K realizácii najľahšieho supravodivého drôtu výrazne prispel nami realizovaný rýchly proces infiltrácie a difúzie Mg do vrstvy bóru a tvorba MgB₂ fázy s vysokými prúdovými hustotami s minimom prasklín a tiež k obmedzenou interakciou medzi Ti a Al.

Nové a zaujímavé výsledky vznikli štúdiom tvárných, elektrických a tepelných vlastností Al+Al₂O₃ materiálu (HITEMAL), ktorý vyvinul čiste na konštrukčné využitie UMMS SAV. Ukázalo sa, že HITEMAL je možné tvárniť s veľkým pretvorením bez žíhaní a pritom je 3-6x pevnejší ako čistý hliník. Obsahom Al₂O₃ fázy sa dajú ovplyvňovať mechanické vlastnosti HITEMALU ako aj jeho elektrická aj tepelná vodivosť pri nízkych teplotách (4-30K). Toto všetko umožnilo použiť HITEMAL na mechanickú a elektrickú stabilizáciu MgB₂ supravodiča metódou rýchlej infiltrácie/difúzie Mg do bóru.

Použitie vonkajšieho obalu na báze Al poskytuje aj výhodu tenkých izolačných Al₂O₃ vrstiev (3-15 μm) pomocou elektrickej oxidácie. Takéto vrstvy majú vysokú tepelnú odolnosť pri žíhaní a tiež dobrú tepelnú vodivosť. To umožňuje konštruovať supravodivé cievky navinuté pred žíhaním („Wind & React“), t.j. vinutia malých priemerov a s vysokým plnením

generujúce vysoké magnetické polia v minimalizovaných objemoch.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

We have realized the main aim of the project - the lightest superconductor with high current densities. It was realized by successful combination of the lightest superconducting phase (2.55 gcm^{-3}) with very light metals for diffusion barrier (Ti - 4.5 gcm^{-3}) and for thermal stabilization HITEMAL (Al - 2.7 gcm^{-3}).

Apparent contribution to the project aim was made through our process of fast infiltration and diffusion of Mg into the boron layer and consequent MgB_2 phase creation having high current densities, minimized micro-cracks and limited interaction between Ti and Al.

New and interesting results raised from the studies of electrical and thermal properties of Al+ Al_2O_3 material (HITEMAL), which was developed by the UMMS SAV only for mechanical purposes. It was shown that HITEMAL can be deformed with high deformation without any intermediate treatment and its strength is 3-6x times larger than for pure aluminium. The content of Al_2O_3 phase affects mechanical properties of HITEMAL as well as its electrical and thermal conductivity at low temperatures (4-30K). All these facts allow to use HITEMAL for effective mechanical and electrical stabilization of MgB_2 superconductor by the process of fast infiltration/diffusion of Mg into boron.