

# Multiréteges szupravezető/árnyékoló lemezes kompozit előállítására új koncepciójú szeptum mágneshez

**Kárpáti V.<sup>1\*</sup>, Szabó G.<sup>2</sup>, Barna D.<sup>3</sup>, Nagy E.<sup>4</sup>, Koncz-Horváth D.<sup>5</sup>, Mertinger V.<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Miskolci Egyetem, Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Wigner Fizikai Kutatóközpont, Nagyenergiás Fizikai Osztály, [viktor.karpati@uni-miskolc.hu](mailto:viktor.karpati@uni-miskolc.hu)

<sup>2</sup> Miskolci Egyetem, Metallurgia Intézet, [szabogabor@uni-miskolc.hu](mailto:szabogabor@uni-miskolc.hu)

<sup>3</sup> Wigner Fizikai Kutatóközpont, Nagyenergiás Fizikai Osztály, [barna.daniel@wigner.hu](mailto:barna.daniel@wigner.hu)

<sup>4</sup> Miskolci Egyetem Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, ELKH Anyagtudományi Kutatócsoport, [femzsofi@uni-miskolc.hu](mailto:femzsofi@uni-miskolc.hu)

<sup>5</sup> Miskolci Egyetem Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, [femkhd@uni-miskolc.hu](mailto:femkhd@uni-miskolc.hu)

<sup>6</sup> Miskolci Egyetem Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, [valeria.mertinger@uni-miskolc.hu](mailto:valeria.mertinger@uni-miskolc.hu)

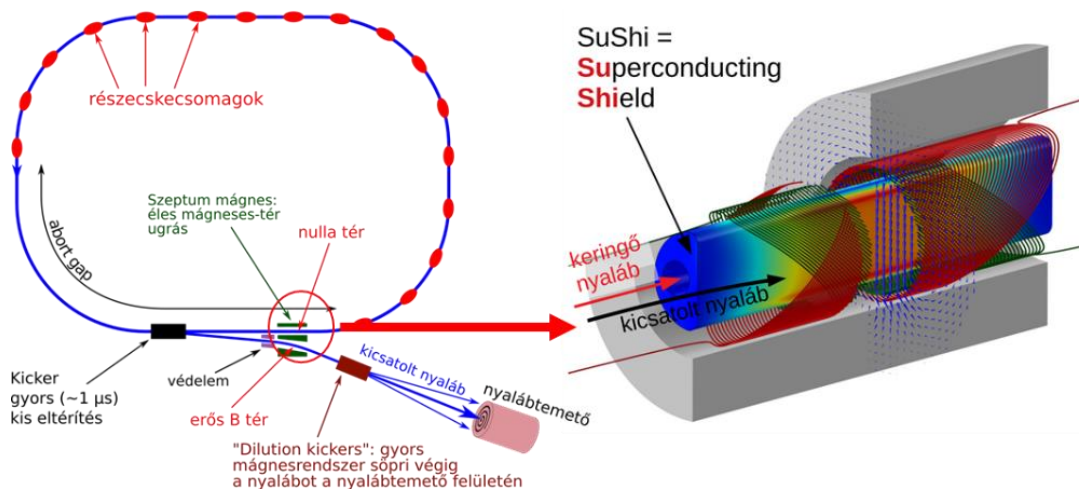
## Absztrakt

A CERN, a Wigner Fizikai Kutatóközpont és a Miskolci Egyetem közös együttműködésének és kutatási tevékenységének célja szupravezető/árnyékoló rétegzett kompozit előállítására. A kutatómunkánk során a hidegprezselési eljárástól indulva, a halmozódó hengerlési eljárásán át, a rakatolt szekvencia hengerlésen keresztül jutottunk el a megoldásra mikor is sikerült létrehozni sokszekvenciás NbTi/Nb/Cu/Nb rétegzett lemezes fémmatériált a szupravezető kábelek szerkezete alapján. Ezt követően a tudományos és technológiai kihívásunk a nióbbium - mint keresztirányú gátló - réteg elhagyása költségcsökkentés céljából úgy, hogy a NbTi/Cu határfelület funkcionalitást rontó alakíthatatlan vegyület fázisoktól mentes legyen. A termodinamikai számításaink és a kísérleti tapasztalataink alapján hengerléssel és hőkezeléssel sikerült NbTi/Cu rétegzett Nb mentes lemezes szerkezeteket előállítanunk.

## 1 Bevezetés

---

Az Európai Nukleáris Kutatási Szervezet (CERN), a Wigner Fizikai Kutatóközpont és a Miskolci Egyetem egy közös kutatási projekt keretében új koncepciójú szeptum mágnes fejlesztését kezdte meg 2019 -ben. A szupravezető anyagok jellegzetessége, hogy nagyon alacsony ügynyezett kritikus hőmérsékleten kizárják magukból a mágneses teret, illetve az elektromos ellenállásuk gyakorlatilag megszűnik [1]. A nióbbium/nióbbium-titán/réz (NbTi/Nb/Cu) anyagtársítást már több évtizede használják szupravezető kábelek előállítására [2]–[5]. A kompozitot az MRI technológiában, illetve részecskegyorsítóknál is alkalmazzák [6]–[7]. A CERN-ben a 2025 utáni időszak tudományos és technológiai kihívása az új ütköztető gyűrű, az FCC (Future Circular Collider) megépítése. A tervezett 100 km átmérőjű alagútban a második fázisban megépülő proton-proton ütköztetőgyűrű 100 TeV tömegközépponti energiát tud biztosítani, ami a jelenlegi, LHC energiájának körülbelül nyolcszorosa, így nő a felfedezési potenciál. Az ütközési ciklus végén, illetve a gyorsítóból érkező bármilyen hibajelzés esetén a nyaláb kicsatolása szükséges (lásd: 1. ábra). A kicsatolást különleges szeptum mágnesek végzik, melyek két, egymástól nagy mértékben különböző, de egymáshoz nagyon közel elhelyezkedő mágneses teret hoznak létre, a keringő, illetve a kicsatolt nyaláb számára. A SuShi szeptum mágnes különlegessége, hogy ezt a térkonfigurációt egy passzív szupravezető mágneses árnyékolás segítségével hozza létre [8]. Az előzetes kísérletek alapján a legígéretesebb anyag erre a célra egy NbTi/Nb/Cu sokrétegzett szupravezető kompozit [9].



1. ábra. LHC ütköztető gyűrűjének sematikus rajza a szeptum mágnes jelölésével [10], [11]

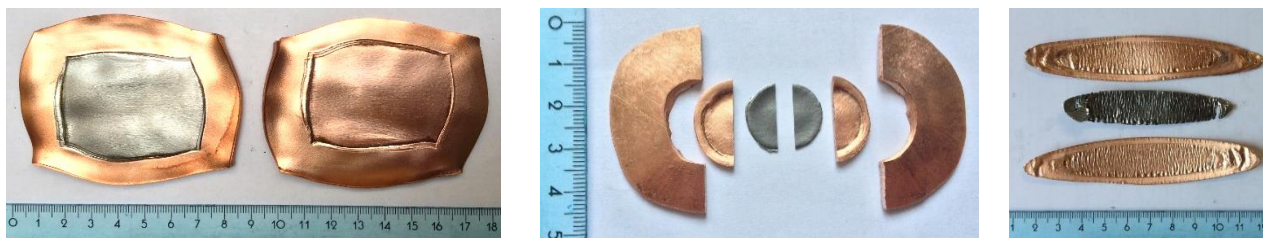
A kompozitban a Cu a “flux jump”, illetve a “quench” jelenségekkel szembeni stabilitást szolgálja a normálvezetővé váló NbTi-nál jelentősen jobb hő- és elektromos vezetése révén, a NbTi szilárdoldat pedig a szupravezető szerepet látja el. A két réteg közötti, nagy hőmérsékleten végbemenő kereszt diffúziót a Nb réteg hivatott megakadályozni [12]. A NbTi réteg nem homogén szilárdoldat, hanem ideális esetben  $\alpha$ -Ti kiválásokat tartalmaz - mely vezető fázis lévén - a mágneses vortexek mozgását akadályozzák és biztosítják a működés közbeni nagy elérhető áramsűrűséget és mágneses teret. A technológia részben ismert [14], a Nippon Steel Co. japán cég a múltban már gyártott nagy rétegszámú lemezes kompozitot hasonló kialakítással, viszont a cég a gyártással leállt és nem érdeke a technológiai ismeretek átadása sem [13].

Kutatómunkánk célja egy jobb és esetleg mind az alapanyag, mind a gyártás szempontjából olcsóbb előállítási technológia kidolgozása. A saját koncepciónk eredendően eltér attól, amit a japán technológiáról ismerünk, valamint alternatívaként a Nb réteg elhagyásának lehetőségét vizsgáljuk, mivel a nióbbium rendkívül drága alapanyag és a diffúzió gátló szerepén kívül más funkciót nem lát el.

## 2 Kísérleti munka és eredményei

### 2.1 Hidegalakítási előkísérletek

A kötés kialakulásának alapfeltétele az ún. deformációs küszöb elérése, ami az érintkező felületek növekedésével van kapcsolatban. A deformációs küszöb azt a minimális alakváltozást jelenti, ami alatt folytonos mechanikai kötés nem alakul ki a rétegek között [14]. Ezen ismeretek alapján hidegprésselési előkísérleteket végeztünk, melyek során 50, 70 és 90%-os hidegalakítási mértékkel dolgoztunk (lásd: 2. ábra).

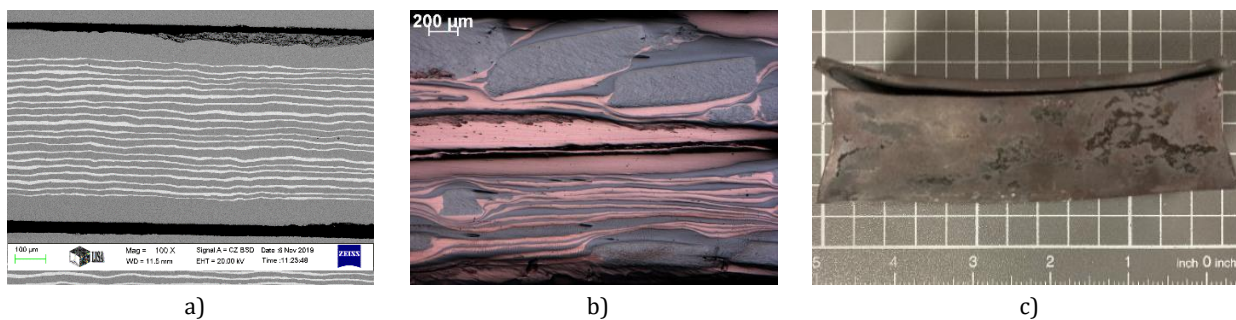


a) b) c)  
2. ábra. a) 50%, b) 70 és c) 90% mértékben hidegprésselt kísérletek eredményeiről készült makrófelvételek

A kísérleti tapasztalataink szerint ilyen nagy mértékű alakváltozás hatására sem történt mechanikus rétegtapadás a Cu/NbTi határfelületen, így a továbbiakban melegalakítási kísérleteket végeztünk.

## 2.2 Cu/Nb/NbTi/Nb rétegrendű lemezes kompozit előállítása hengerléssel

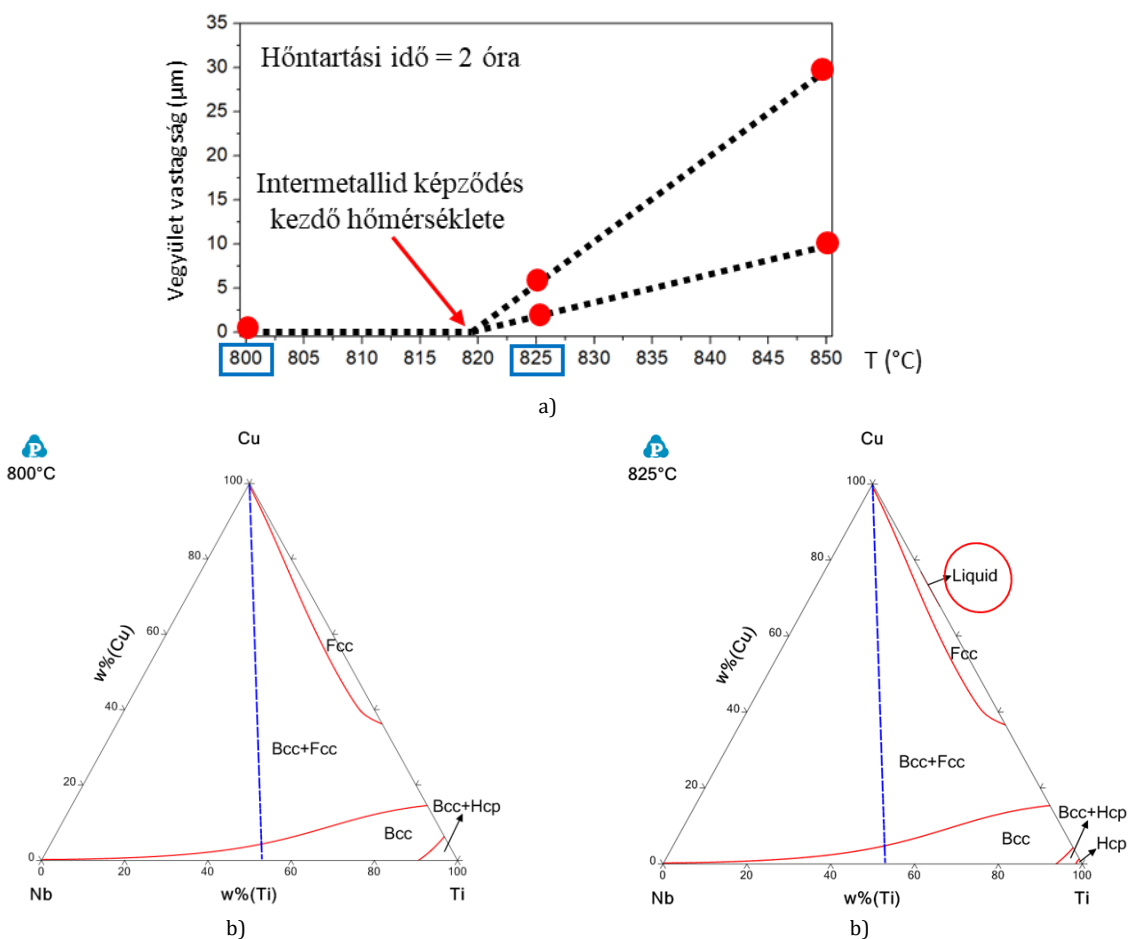
Ismereteink szerint a kompozit hengerléssel történő gyártása több lépésből épül fel: alapanyagok (NbTi, Nb, Cu) előhengerlése, oxidációtól védő kazettába történő zárása, majd meleg- és hideghengerlése vagy termikus-mechanikus kezelése, esetleges véghőkezelése. A hengerlési kísérleteinkhez minden esetben OFHC rezet és Nb53wt%-Ti alapanyagokat használtunk. A Nb és NbTi újrakristályosodási hőmérsékletének meghatározása után sikerült egy, öt és tíz (3. ábra a.) szekvenciás, azaz összesen negyven rétegből álló NbTi/Nb/Cu/Nb rétegrendű lemezes kompozitot előállítani. Kísérleteink során megfigyeltük, hogy a nagyobb rétegszám alkalmazása esetén nem kívánt, alakíthatatlan vegyületfázisok jelentek meg a szerkezetben (3. ábra b.). Az előállítási kísérletek során a hagyományos kazetta zárási technika miatt a 800°C alatt történő hengerlési kísérleteink hibaszázaléka magas volt, a kazetta záró fedele rendszeresen felnyílt a meleghengerlési lépések elején (3. ábra c.). A fent említett tapasztalatok miatt, alacsonyabb hőmérsékletű kísérletek elvégezhetősége céljából elektronsugaras hegesztést alkalmaztunk a továbbiakban a kazetta lezárására.



3. ábra. a) hiba mentes tíz szekvenciás, b) anomáliákkal terhelt szerkezetű kompozitok keresztmetszeti, optikai mikroszkóppal készített felvétele és c) felnyílt kazettáról készült makrófelvétel

## 2.3 NbTi/Cu határfelületi folyamatainak vizsgálata

A bevezetésben említettek alapján a kutatásunk célja egy olcsóbb vagy jobb kompozit létrehozása, ezért vizsgálati kísérleteket végeztünk, hogy mi történik abban az esetben, ha költségcsökkentés céljából a drága és a keresztidiffúzió gátlásán kívül más szerepet be nem töltő nióbbium réteget elhagyjuk, vagy ha ez meleghengerlés közben felszakad és a NbTi/Cu határfelület érintkezik. Az irodalmi adatok alapján ismert, hogy a NbTi és a Cu réteg magas hőmérsékleten történő érintkezése során különböző sztöchiometriájú  $(\text{Nb})\text{Ti}_x\text{-Cu}_y$  vegyületek alakulnak ki [15], viszont a szakirodalomban ismert NbTi/Cu határfelületen végbemenő folyamatok eredménye jelentősen eltérő [16]–[20] és az idő tényező mellett jelentős hatása van a vegyületképződésre a kötés típusának is. Az eltérő irodalmi adatok miatt kísérletsorozattal vizsgáltuk a vegyületképződési hajlamot. Gyűrűs kialakítású diffúziós párokon vizsgáltuk, hogy adott hőmérséklet hatására (400-900°C), két óra hőntartás esetén milyen fázisok alakulnak ki [21], melyeket CALPHAD számításokkal validáltunk [22].



4. ábra. A diffúziós kísérleti eredmények és a termodinamikai számítások közötti kapcsolat. a) extrapolálási eredmények, b) Az intermetallidok kizárásával számolt Nb-Ti-Cu ternér diagram 800°C-on és c) Az intermetallidok kizárásával számolt Nb-Ti-Cu ternér diagram 825°C-on (a piros kör az olvadék fázis megjelenését mutatja) [22]

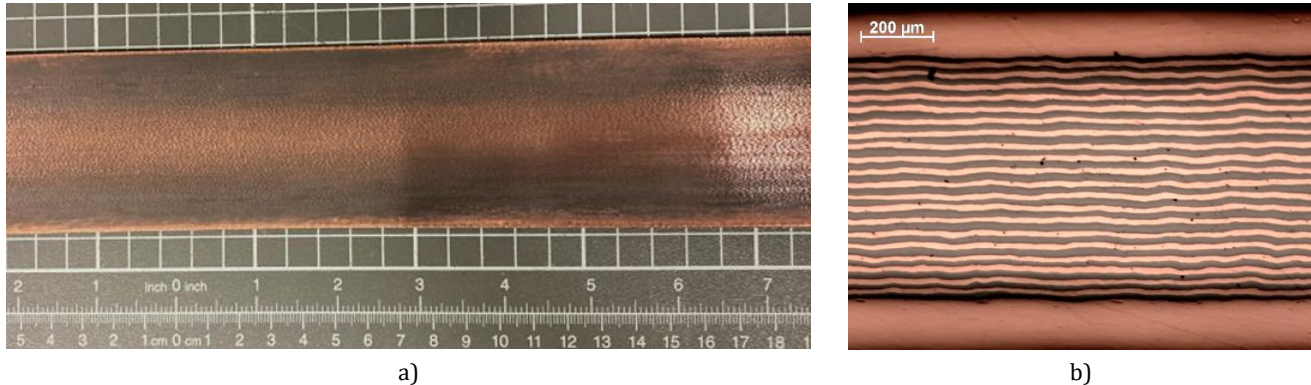
A kísérletileg meghatározott NbTi/Cu határfelületen létrejövő intermetallidok hőmérséklet függésének extrapolálási eredményei alapján az intermetallidok képződése 820°C körül kezdődik (lásd:4. ábra). A kísérletileg meghatározott eredmény jól korrelál a CALPHAD számítási eredményeivel, miszerint 819°C -on az olvadék fázis megjelenik a Cu-Ti rendszerben. Az olvadék fázisban ezen és az e feletti hőmérsékleten a megnövekedett diffúziós sebesség miatt, intenzív intermetallid képződés várható, már 819°C-on 2 óra után vagy a felett. Természetesen az olvadékfázis jelenlétét minden esetben kerülni kell. A kísérleti eredmények nagy pontossággal modellezhetők, amennyiben az intermetallidokat kizárva, nem egyensúlyi fázisdiagramokat számolunk. Az elvégzett kísérletek segítségével modellezni lehet az előhevítés és a meleghegerlés hatását abban az esetben, ha a rétegrendből a Nb réteget kihagyjuk.

## 2.4 Nb mentes NbTi/Cu lemezes kompozit előállítása

A kutatómunkánk során továbbá a termodinamikai számításokat és a gyakorlati tapasztalatokat felhasználva saját ötleten alapuló Nb mentes kompozit lemez előállítását végeztük hengerléssel. A kísérletünkhöz nagy tisztaságú Cu készült kazettát alkalmaztunk, hogy a szekvenciát megóvjuk az oxidációtól. A kazettafelnyílás elkerülése céljából a rézkazettákat a betétekkel együtt elektronsugarasan hegesztettük. Kezdetben a kazettát minden



esetben melegen hengereltük. A meleghengerlés közben visszamelegítést alkalmaztunk az állandó alakítási hőmérséklet megőrzése érdekében. Az utolsó melegsűrítés után a kazettát hideghengereltük az aktuális végvastagságig (5. ábra a.). A számolt és mért adatoknak megfelelően előhevítési hőmérsékletnek minden esetben 800°C alatti hőmérsékletet, állítottunk be.

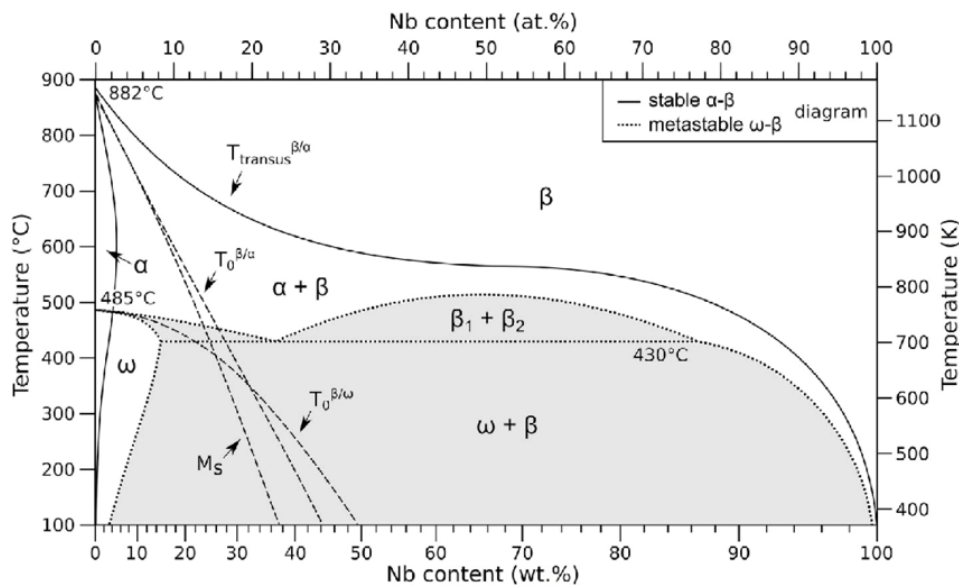


5. ábra. a) Hengerelt 1 mm végvastagságú kompozitlemez, b) a nióbbium mentes kompozit lemezeről készült optikai felvétel

A felvételek alapján megállapítható, hogy Nb mentes kísérlet sikeres volt, a szerkezetben nem található durva anomália (5. ábra b.), a kísérletet sikeresen reprodukáltuk.

## 2.5 Nb mentes NbTi/Cu lemezes kompozit hőkezelése

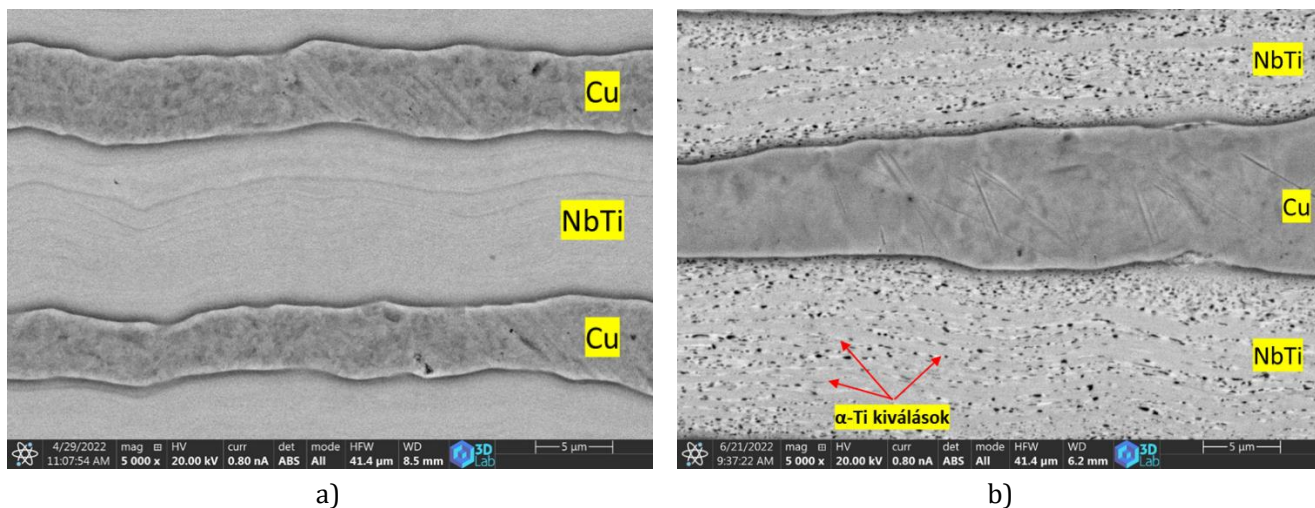
A hőkezelés célja homogén  $\beta$  fázisból történő  $\alpha$ -Ti kiválások képzése. A kiválásképzés célja a mágneses vortexek stabilizálása, nagy kritikus áramsűrűség elérése nagy mágneses térben. A kiválások akkor töltik be funkcionálisukat, ha a szerkezetben apró, homogén eloszlásúak és sok van belőlük. Irodalmi adatok alapján a kiválásképzést erősen alakított szerkezeten végzik több tíz órás hőntartással.



6. ábra Nb-Ti egyensúlyi fázisdiagram [23]

A 6. ábra a Nb-Ti binér fázisdiagramot szemlélteti [23], az ábra alapján megfigyelhető, hogy a kiválás képződés 600°C alatti tartományban indul meg Nb~50wt%-Ti esetén és 500°C körül tud a legtöbb  $\alpha$ -Ti kiválás megjelenni. A hőkezelési hőmérsékletről az irodalmi eredmények megoszolók, az alkalmazott hőntartási hőmérséklet jellemzően 350-500°C közötti tartományban van [24], [5], [25].

Hőkezelési előkísérleteink során ciklikus termikus/mechanikus kezeléssel szupravezető NbTi szilárdoldatos ötvözetben  $\alpha$ -Ti kiválásokat hoztunk létre. Különböző mértékű hidegalakításokat alkalmaztunk ( $\epsilon=74, 91, 97, 98\%$ ) és köztük 375°C-on történő vákuum hőkezeléseket végeztünk. Röntgendiffrakciós vizsgálatok és Rietveld analízis alapján megállapítottuk, hogy a képlékenyalakítás mértékének növelése, illetve a hőkezelési idő növelése az  $\alpha$ -Ti mennyiségét növeli (lásd: 7. ábra). Az elvégzett hőkezelési előkísérleteink során megfigyeltük, hogy az  $\alpha$ -Ti kiválások mellett megjelenik az alap  $\beta$ -szilárd oldat mellett két másik eltérő titán koncentrációjú  $\beta$ -szilárd oldat is. Az irodalomban ismert, hogy a Nb alapú ötvözetek bizonyos hőmérsékleten hajlamosak a spinódális bomlásra [26]–[29].



7. ábra. a) Nem hőkezelt és b) Hőkezelt NbTi/Cu kompozit elektronmikroszkópi felvétele 5000x-es nagyításban

Az előkísérleti eredményeket és az irodalmi ismereteket felhasználva hidegalakítás és hőkezelés kombinációját megfelelően alkalmazva sikerült létrehozni negyven rétegből álló NbTi/Cu lemezes kompozitot. A kompozitban a NbTi és a Cu rétegek átlagos rétegvastagsága 10  $\mu\text{m}$ , illetve az elvégzett Rietveld illesztés alapján a kompozit közel 14%  $\alpha$ -Ti kiválást tartalmaz, melyet a 7. ábra b. szemléltet.

### 3 Összefoglalás

Jelen publikációnkban bemutattuk, hogy kutatómunkánk során milyen tudományos és technológiai kihívásokat teljesítettünk. Sikerült egy, öt és tíz szekvenciás, NbTi/Nb/Cu/Nb rétegrendű lemezes kompozitot előállítani. A Cu-Ti vegyületképződési kísérleti eredmények nagy pontossággal modellezhetők, amennyiben az intermetallidokat kizárva, nem egyensúlyi fázisdiagramokat számoltunk. Az elvégzett szisztematikusan felépített fizikai szimulációk és termodinamikai számítások alapján Nb mentes NbTi/Cu lemezes kompozitot állítottunk elő, funkcionalitást rontó vegyületfázisok képződése nélkül. Az előállított kompozitban a NbTi és a Cu rétegek átlagos rétegvastagsága 10  $\mu\text{m}$ . Röntgendiffrakciós vizsgálatok és az alkalmazott Rietveld analízis alapján megállapítottuk, hogy a képlékenyalakítás mértékének növelése, illetve a hőkezelési idő növelése az  $\alpha$ -Ti mennyiségét növeli. Az előkísérleti és az irodalmi eredmények kombinációjával sikerült közel 14%  $\alpha$ -Ti kiválást tartalmazó szupravezető kompozitot előállítani.

### 4 Köszönetnyilvánítás

A tématerületi kutatás a Miskolci Egyetemen, egyfelől az Innovációs és Technológia Minisztérium támogatásával zajló Tématerületi Kiválósági Program keretében támogatott projekt részeként (Támogatói Okirat ikt. száma: NKFIH-846-8/2019), másfelől a Miskolci Egyetem „Társadalmi hasznosság növelő fejlesztések a hazai felszín alatti természeti erőforrások hatékonyabb kiaknázása és hasznosítása területén” című, az Innovációs és Technológia Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kibocsátott támogatói okirat (Támogatói Okirat ikt. száma: TKP-

17-1/PALY-2020) alapján zajló projektje részeként valósult meg. „A kutatómunkánk az Innovációs és Technológiai Minisztérium Kooperatív Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.” „A 2019-2.1.6-NEMZ\_KI-2019-00005 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2019-2.1.6-NEMZ\_KI pályázati program finanszírozásában valósult meg.” Köszönettel tartozunk Végh Ádámnak a Thermo-Calc szoftverrel végzett fázisdiagram számításért. Köszönettel tartozunk Prof. Dr. Kaptay Györgynek és Korózs Józsefnek a termodinamikai számításokban nyújtott segítségükért.

## 5 Irodalomjegyzék

---

- [1] X. Gui, B. Lv, and W. Xie, 'Chemistry in Superconductors', *Chem. Rev.*, vol. 121, no. 5, pp. 2966–2991, Mar. 2021, doi: 10.1021/acs.chemrev.0c00934.
- [2] S.-M. Park *et al.*, 'Effect of ECAP on Change in Microstructure and Critical Current Density of Low Temperature Super-Conducting Monowire', *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 20, no. 9, pp. 1563–1572, Sep. 2019, doi: 10.1007/s12541-019-00164-3.
- [3] P. Zhang *et al.*, 'NbTi superconducting wires and applications', in *Titanium for Consumer Applications*, Elsevier, 2019, pp. 279–296. doi: 10.1016/B978-0-12-815820-3.00010-1.
- [4] K. Matsumoto, M. Nakajima, Y. Tanaka, and K. Osamura, 'Superconducting properties and microstructures in NbTi superconducting wires', *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, no. 2, pp. 1125–1128, Mar. 1991, doi: 10.1109/20.133379.
- [5] H. B. Ouyang *et al.*, 'Influence of Final Drawing Strain on the  $J_c$  of NbTi Superconductor', *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, pp. 6001003–6001003, Jun. 2012, doi: 10.1109/TASC.2011.2176892.
- [6] Y. V. Karasev *et al.*, 'The Superconducting NbTi Wire for the CBM Dipole Magnet', *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 35, no. 3, pp. 705–710, Mar. 2022, doi: 10.1007/s10948-022-06143-6.
- [7] X.-J. Sun *et al.*, 'Superconducting multipole wiggler with large magnetic gap for HEPS-TF', *Nucl. Sci. Tech.*, vol. 33, no. 2, p. 16, Feb. 2022, doi: 10.1007/s41365-022-01001-5.
- [8] D. Barna, 'High field septum magnet using a superconducting shield for the Future Circular Collider', *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 20, no. 4, p. 041002, Apr. 2017, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.041002.
- [9] D. Barna *et al.*, 'NbTi/Nb/Cu Multilayer Shield for the Superconducting Shield (SuShi) Septum', *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 1, pp. 1–8, Jan. 2019, doi: 10.1109/TASC.2018.2872860.
- [10] Dr. Barna Dániel, 'A Future Circular Collider exotikus kicsatoló mágnes', Miskolc, Feb. 17, 2020.
- [11] Dr. Siklér Ferenc, 'Új tudományos és technikai kihívások a CERN kutatási programjában', Miskolc, Oct. 18, 2019.
- [12] D. Barna *et al.*, 'Conceptual design of a high-field septum magnet using a superconducting shield and a canted-cosine-theta magnet', *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 90, no. 5, p. 053302, May 2019, doi: 10.1063/1.5096020.
- [13] I. Itoh, T. Sasaki, S. Minamino, and T. Shimizu, 'Magnetic shielding properties of NbTi/Nb/Cu multilayer composite tubes', *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 3, no. 1, pp. 177–180, Mar. 1993, doi: 10.1109/77.233699.
- [14] L. Li, K. Nagai, and F. Yin, 'Progress in cold roll bonding of metals', *Sci. Technol. Adv. Mater.*, vol. 9, no. 2, p. 023001, Apr. 2008, doi: 10.1088/1468-6996/9/2/023001.
- [15] D. C. Larbalestier, P. J. Lee, and R. W. Samuel, 'The Growth of Intermetallic Compounds at a Copper-Nb-Titanium Interface', in *Advances in Cryogenic Engineering Materials*, vol. 32, R. P. Reed and A. F. Clark, Eds. Boston, MA: Springer US, 1986, pp. 715–722. doi: 10.1007/978-1-4613-9871-4\_85.
- [16] L. Xu, W. Wang, and Y. Zhuang, 'Diffusion reactions between Cu and NbTi-alloy', *Acta Metall. Sin. Engl. Lett.*, vol. 2, p. 41, 1989.
- [17] C. Scheuerlein *et al.*, 'Temperature induced degradation of Nb-Ti/Cu composite superconductors', *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 234, no. 2, p. 022031, Jun. 2010, doi: 10.1088/1742-6596/234/2/022031.



- [18] V. Raginel *et al.*, 'First Experimental Results on Damage Limits of Superconducting Accelerator Magnet Components Due to Instantaneous Beam Impact', *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 4, pp. 1–10, Jun. 2018, doi: 10.1109/TASC.2018.2817346.
- [19] D. Bozic, J. Stasic, B. Dimcic, M. Vilotijevic, and V. Rajkovic, 'Multiple strengthening mechanisms in nanoparticle-reinforced copper matrix composites', *Bull. Mater. Sci.*, vol. 34, no. 2, pp. 217–226, Apr. 2011, doi: 10.1007/s12034-011-0102-8.
- [20] M. Konieczny, 'Processing and microstructural characterisation of laminated Ti-intermetallic composites synthesised using Ti and Cu foils', *Mater. Lett.*, vol. 62, no. 17–18, pp. 2600–2602, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.matlet.2007.12.067.
- [21] Viktor K., Gábor S., Máté S., Ádám V., Dániel K.-H., and Valéria M., 'Nb-Ti/Cu bimetal határfelületi diffúziós folyamatainak vizsgálata', p. 9.
- [22] V. Kárpáti, J. Korozs, G. Kaptay, and V. Mertinger, 'On formation of intermetallic compounds at the Copper /Nb-Titanium interface', *J. Alloys Compd.*, vol. 918, p. 165567, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jallcom.2022.165567.
- [23] M. Bönisch *et al.*, 'Thermal stability and latent heat of Nb-rich martensitic Ti-Nb alloys', *J. Alloys Compd.*, vol. 697, pp. 300–309, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.12.108.
- [24] G. E. Storozhilov, N. F. Andrievskaya, and M. A. Tikhonovsky, 'INFLUENCE OF MECHANICAL-THERMAL TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE AND CURRENT-CARRYING CAPACITY OF Nb-Ti-SUPERCONDUCTOR', *Probl. At. Sci. Technol.*, pp. 220–229, Jan. 2020, doi: 10.46813/2020-125-220.
- [25] P. J. Lee and D. C. Larbalestier, 'Nb-Titanium Superconducting Wires: Nanostructures by Extrusion and Wire Drawing', *Wire J. Int.* 36261-66, p. 8, 2003.
- [26] T. E. Whitfield, G. J. Wise, E. J. Pickering, H. J. Stone, and N. G. Jones, 'An Investigation of the Miscibility Gap Controlling Phase Formation in Refractory Metal High Entropy Superalloys via the Ti-Nb-Zr Constituent System', *Metals*, vol. 11, no. 8, p. 1244, Aug. 2021, doi: 10.3390/met11081244.
- [27] J. Gao, C. Li, J. Dang, C. Guo, and Z. Du, 'Experimental determination and thermodynamic description of the Nb-V binary system', *J. Alloys Compd.*, vol. 768, pp. 316–322, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.07.254.
- [28] Y. H. Wang, D. C. Zhang, Z. P. Pi, J. G. Lin, and C. Wen, 'Phase field simulation of spinodal decomposition in Zr-Nb alloys for implant materials', *J. Appl. Phys.*, vol. 126, no. 8, p. 085102, Aug. 2019, doi: 10.1063/1.5096820.
- [29] P. E. A. Turchi, 'Thermodynamic, Diffusion, and Physical Properties of Nb-Ti-U-Zr Alloys', LLNL-TR--752282, 1459146, May 2018. doi: 10.2172/1459146.