



## MIKROKOMPOZITINIŲ CU-NB LAIDININKŲ YPATUMŲ IR JŲ SUJUNGIMO GALIMYBIŲ ANALIZĖ

Gediminas MIKALAUSKAS<sup>1</sup>, Nikolaj VIŠNIAKOV<sup>2</sup>, Raimonda LUKAUSKAITĖ<sup>3</sup>,  
Jelena ŠKAMAT<sup>4</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

*El. paštas: <sup>1</sup>gediminas.mikalauskas@vgtu.lt; <sup>2</sup>nikolaj.visniakov@vgtu.lt; <sup>3</sup>raimonda.lukauskaite@vgtu.lt;*

*<sup>4</sup>jelena.skamat@vgtu.lt*

**Santrauka.** Stiprių magnetinių laukų sistemos plačiai taikomos fundamentiniams ir taikomiesiems tyrimams įvairiose mokslo šakose ir industrijoje. Tokomakai, stelaratoriai, superlaidūs magnetai, CERN kolaideris, ITER reaktorius, levitacinės sistemos – tai vieni žinomiausių tokių magnetinių sistemų pavyzdžių. Visų magnetinių sistemų svarbiausias komponentas yra induktorius (solenoidas). Rekordinis magnetinis laukas jau siekia 100 T. Stipriam magnetiniam laukui sukurti jau nepakanka vien tik tobulinti solenoidų konstrukciją. Tradicinės elektrotechninės medžiagos ir laidininkai jau negali atlaikyti didžiulių mechaninių ir temperatūrinių apkrovų. Todėl jas keičia visiškai naujos perspektyvios medžiagos, tarp jų svarbią vietą užima Cu-Nb mikrokompozitiniai laidininkai. Šios medžiagos pasižymi unikalia struktūra, puikiomis mechaninėmis savybėmis ir geru elektriniu laidumu. Viena iš svarbių neišspręstų problemų stiprių magnetinių laukų sistemose lieka patikimų neardomųjų jungčių sukūrimas ir jų patikimų sujungimo technologijų paieška, nes dauguma tokių magnetų konstrukcijų turi būti neardomos pradėjus jas eksploatuoti. Tačiau daugiausia jų konstrukcijoje laidininkams sujungti taikomos tik ardomos, deja, praktikoje dideliu patikimumu nepasizyminčios varžtinės arba lituotinės jungtys. Šiame darbe apžvelgti stiprių magnetinių laukų sistemų konstrukciniai ypatumai, perspektyvių Cu-Nb laidininkų struktūros ypatumai ir savybės, kompozitinių laidininkų gamybos specifika, taikymo sritys, sujungimo problemos ir taikytinos sujungimo technologijos.

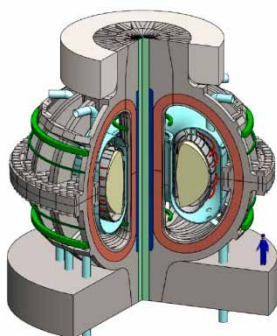
**Reikšminiai žodžiai:** Cu-Nb laidininkai, mikrokompozitai, virintinės jungtys.

### Įvadas

Šiais laikais magnetiniai laukai plačiai taikomi įvairiose mokslo, pramonės ir medicinos srityse. Jų naudojimo galimybėmis domisi netgi kosminės agentūros ir karo pramonė. Tai sparčiai besivystanti mokslo sritis ir technologijos, kur taikomi impulsiniai, nuolatinio veikimo, sūkuriniai magnetiniai laukai. Laboratorinėmis sąlygomis jau sukurti pirmieji įrangos prototipai ir sugeneruoti ypač stiprūs magnetiniai laukai, kurių magnetinio laiko indukcija (tankis) siekia 100 T (Kindo 2006). Apskritai didžiausias laboratorinėmis sąlygomis sugeneruoto magnetinio lauko tankis siekė net 2800 T, tačiau tai buvo eksperimentas su magneto eksplozija. Šis rekordas buvo pasiektas dar 1998 m., kuris iki šiol nėra pagerintas (Tesanovic 2013). Tačiau tokiems rekordiniams magnetiniams laukams generuoti skirta techninė įranga yra labai sudėtinga ir kol kas unikali. Daug paskutinių dešimtmečių svarbių atradimų buvo padaryta taikant būtent stiprų magnetinį lauką. Stiprūs magnetiniai laukai tapo vienu iš labai svarbių mokslininkų instrumentų, nes jie sukelia unikalius efektus: levitaciją, medžiagų struktūros

pokyčius ir fazinius virsmus, magnetinį frakcijų separavimą, magnetinę anizotropiją ir orientaciją, superlaidumą ir kitus efektus. Vis daugiau įvairių mokslo krypčių mokslininkų įsitraukia į šią tyrimų sritį ir didžiausią pažangą bei patirtį šių technologijų srityje turinčios tyrimų laboratorijos ir mokslo centrai iš įvairių šalių kooperuojasi bendriems tarptautiniams mokslo projektams vykdyti (Spahn *et al.* 2011). Garsiausi projektai, tokiems mokslo centrums ir tarptautinėms kooperacijoms bendradarbiaujant, jau įgyvendinti, yra vykdomi arba numatyti perspektyvūs projektai: eksperimentinis (ITER) termobranduolinis reaktorius ir kiti tokomakai, didysis hadronų priešpriešinių srautų greitintuvas CERN laboratorijoje, naujos kartos kompaktiškas ARC reaktorius (1 pav.). Lyginant nuolatinio veikimo, impulsinius ar superlaidumu pagrįstus magnetus, impulsinės technologijos stipriems magnetiniams laukams generuoti yra labai patrauklios, nes nereikalauja tokių didelių investicijų, kaip pirmiau įvardytos unikalių sistemų (Herlach, Miura 2003). Norint generuoti magnetinį lauką, didesnį negu 2 T, jau reikalingi tuščiaviduriai superlaidūs solenoidai

arba kitos įvairios hibridinės sistemos. Didžiausias nuolatinis magnetinis laukas, kurį pavyko 2003 m. pasiekti naudojant hibridinį magnetą, yra 45 T, 2011 m. – naudojant 35,4 T superlaidų magnetą, o 2010 m. – 36,2 T varžinį magnetą. Didesnio magnetinio tankio nei 45 T laukai gali būti generuojami tik trumpų impulsų pavidalu. Dabartinis impulsinių magnetų rekordas – pasiektas lauko tankis 100 T esant 10  $\mu$ s impulso trukmei nesuardant paties magneto. Šis rekordas buvo pasiektas Los-Alamoso nacionalinėje laboratorijoje 2012 m. testuojant impulsinį magnetą, kuriame panaudoti Cu-Nb mikrokompozitiniai laidininkai (Tesanovic 2013).

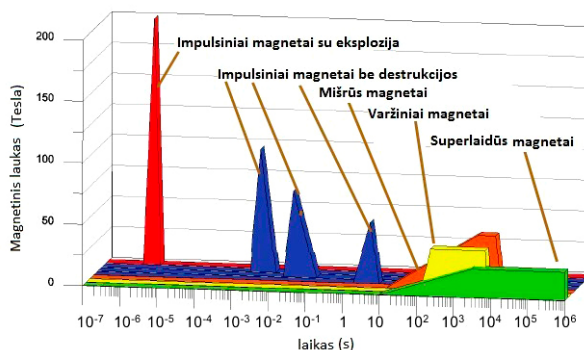


1 pav. ARC reaktoriaus 3D vizualizacija: konstrukcijos pagrindą sudaro superlaidūs 9.2 T toroidinis magnetas (Sorbom *et al.* 2015)

Fig. 1. ARC reactor 3D visualization: design based on 9.2 T superconducting toroidal magnet (Sorbom *et al.* 2015)

Kaip matoma iš 2 pav., impulsiniai magnetai pajėgūs sugeneruoti kur kas stipresnį magnetinį lauką nei nuolatinio veikimo ar superlaidūs magnetai, todėl impulsinės magnetinės sistemos tampa puikia kitų magnetinių laukų technologijų alternatyva daugelyje sričių. Stipraus nuolatinio magnetinio lauko generavimas yra didelė prabanga dėl reikalingos tokiai įrangai sumontuoti infrastruktūros, brangių medžiagų, didelių žmogiškųjų, energetinių ir kitų išteklių. Tokiems laukams generuoti skirtos magnetinės sistemos yra labai sudėtingos ir brangios. Tokią įrangą gali sau leisti turėti ir ja eksperimentuoti tik stambios pasaulinio lygio laboratorijos ar mokslo centrai.

Todėl pastaruoju metu mokslininkų žvilgsniai krypta į mažai energijos suvartojančias, tačiau rekordinius magnetinius laukus generuojančias ir minimalios infrastruktūros reikalaujančias impulsinių magnetinių laukų sistemas ir įrangą, kurios dažniausiai visiškai pakanka daugeliui eksperimentinių tyrimų atlikti ten, kur reikia tokių stiprių magnetinių laukų. Be to, impulsinės magnetinės sistemos kur kas kompaktiškesnės, nėra tokios sudėtingos konstrukcijos, todėl plačiau paplito ir prieinamos didesniai ratui mokslininkų, tyrėjų ir gamintojų.



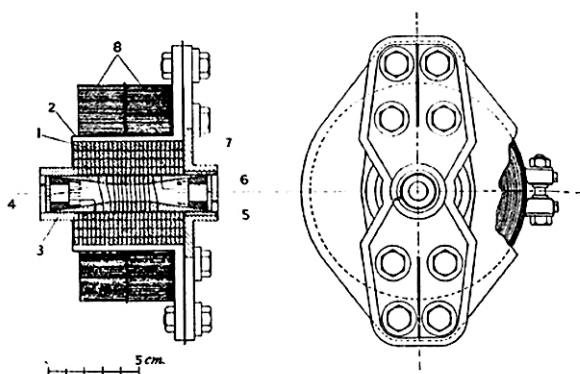
2 pav. Generuojami magnetiniai laukai (Tesanovic 2013)

Fig. 2. Created magnetic fields (Tesanovic 2013)

### Stiprių magnetinių laukų impulsinių magnetų konstrukciniai ypatumai

Svarbiausia impulsinių ir nuolatinio veikimo magnetų dalis yra induktoriai. Eksperimentai ir bandymai tobulinti jų konstrukciją vyksta iki šiol, o problema lieka tokia pat aktuali. Dar 1920 m. mokslininkai Kapitsa ir Wall savo eksperimentuose sugeneravo 10 T impulsinius magnetinius laukus laukui generuoti naudodami nesudėtingos konstrukcijos vnyiojamuosius induktorius, kurie net nebuvo aušinami (3 pav.).

Laidininkai ataušdavo tarp generuojamų impulsų, todėl pauzė tarp impulsų buvo labai ilga (Shneerson *et al.* 2006). Nuo šių pirmųjų eksperimentų generuojamos magnetinės indukcijos amplitudė pasiekė jau 100 T, o induktorių laidininkus veikiantys mechaniniai įtempiai dėl magnetinio lauko poveikio viršija 4 GPa. Todėl impulsinio magnetinio lauko generavimo įrangos ir jos svarbiausių komponentų tobulinimas lieka itin svarbus ir sudėtingas uždavinys.

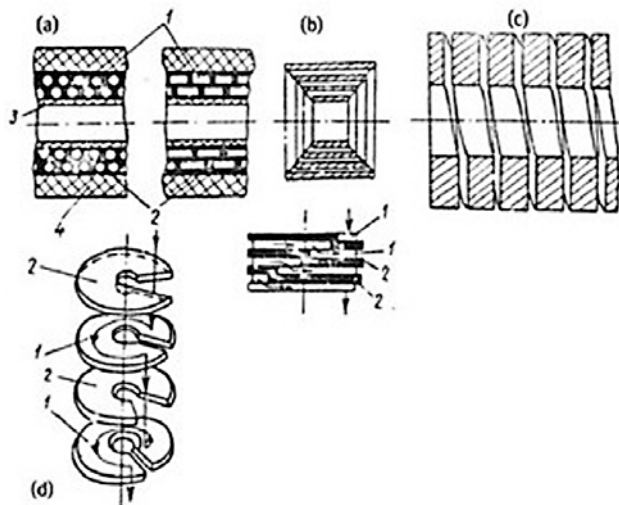


3 pav. Kapitsos solenoido konstrukcija: 1 – daugiasluoksnės vijos; 2, 7 – ritės korpuso dalys; 3, 6 – žiediniai elektriniai kontaktai; 4 – cilindras; 5 – dielektrikas; 8 – armavimo žiedas (Shneerson *et al.* 2006)

Fig. 3. Kapitsa solenoid construction: 1 – multilayer coil; 2, 7 – coil body parts; 3, 6 – circular electrical contacts; 4 – cylinder; 5 – dielectric; 8 – reinforcement ring (Shneerson *et al.* 2006)

Egzistuoja keturi tipai daugiasluoksnių induktorių, kuriems naudojami vielos, juostos, sraigto ir disko formos laidininkai. Daugiasluoksnių induktorių konstrukcija pateikta 4 pav. (Shneerson *et al.* 2006). Daugiausia impulsinių magnetų konstrukcijose paplitę cilindriniai vyniojamieji daugiasluoksniai solenoidai. Bitterio ir vienasluoksniai solenoidai lieka nepakeičiami, kai reikia sugeneruoti labai mažos trukmės stiprų impulsą. Tipinės cilindrinės konstrukcijos impulsiniai induktoriai sudaryti iš daugybės laidininko vijų (3 ir 4 pav., a). Tokiems induktoriams vynioti gaminami ir naudojami daugiausia apvalios ir stačiakampio formos laidininkai. Taikant stačiakampio formos laidą gaunamas didesnis užpildymo faktorius nei su apskritimo formos skerspjuvio laidininkais. Laidininkams vynioti gali būti naudojamos specialios automatizuotos staklės (Suzuki *et al.* 2001), tačiau jei laidininko skersmuo nėra didelis, pakanka paprastų pedalu valdomų motorizuotų (geriausia – reversinių) ar net mechaninių (ranka sukamų) staklių su vielos įtempimą palaikančiu mechanizmu.

Dar viena iš induktorių konstrukcijos tobulinimo strategijų – tai modulinė struktūra, kai solenoidas suskaidomas į kelis bendraašius modulius su nepriklausomo maitinimo sistema. Dėl poreikio nuolat stiprinti magnetinio lauko tankį impulsinių magnetų konstrukcija nuolatos tobulinama, taikant naujas elektrotechnines medžiagas, sluoksnių vyniojimo technika. papildomai armuojiant.



4 pav. Daugiasluoksnių induktoriaus konstrukcijos pavyzdžiai: 1 – laidininkai; 2 – izoliacija; 3 – ritė; 4 – armavimo sluoksniš; a – induktorius su spirale vyniojamu laidininku; b – induktorius su juostiniu laidininku; c – induktorius su sraigtinu laidininku (Bitterio solenoidas); d – induktorius su diskiniu laidininku (Shneerson *et al.* 2006)

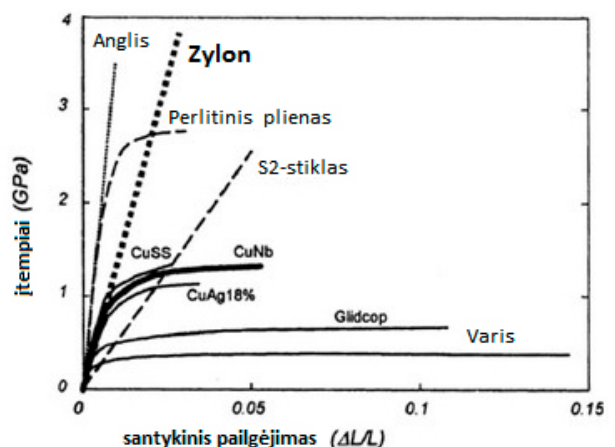
Fig. 4. Design examples of multilayer inductor:

1 – conductors; 2 – isolation; 3 – coil; 4 – reinforcement layer; a – inductor with spiral wound conductor; b – inductor with a strip conductor; c – inductor with screw conductor (Bitter coil); d – inductor with circular conductor (Shneerson *et al.* 2006)

### Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų struktūra, savybės ir taikymo sritys

Laidininko parinkimas tam tikros konstrukcijos magnetui priklauso nuo planuojamo generuoti magnetinio lauko charakteristikų. Magnetinių laukų induktoriuose taikomų laidininkų dvi charakteristikos yra ypač svarbios: stiprumas ir laidumas. Iki 1980 m. induktoriams vynioti buvo taikomi tik vario laidininkai. Varis – geras šilumos ir elektros laidininkas, tačiau ši medžiaga turi silpną mechaninį stiprį, o induktorių varinės vijos neatlaiko dėl magnetinio lauko poveikio jas veikiančios Lorentzo jėgos (Višniakov *et al.* 2011). Rimtas proveržis šioje srityje buvo padarytas tik atsiradus metalo kompozitiniams laidininkams. Medžiagos, skirtos generuojančių 5–100 T magnetinį lauką solenoidų apvijoms, turi būti stiprios (stipris – daugiau nei 750 MPa) ir laidžios (elektrinis laidis – per 60–70 % IACS, *International Annealed Copper Standard* – gryno vario laidumo etalonas). Didelis stipris reikalingas milžiniškoms Lorentzo jėgoms atlaikyti, o geras elektrinis laidumas – laidininkų šilimui minimizuoti dėl tekančios šiais laidininkais didelės elektros srovės.

Taip pat šios medžiagos privalo pasižymėti tokiu plastiškumu, kad laidininkai nelūžtų ir netrukintų vyniojant induktorių apvijas (Gluchovski *et al.* 2014). Šiuo metu impulsinių magnetų induktoriuose naudojamos keturios rūšys kompozitinių laidininkų: Cu-Nb ir Cu-Ag mikrokompozitai, GlidCop, CuSS makrokompozitas (5 pav.) (Shneerson *et al.* 2006). Cu-Nb mikrokompozitas yra šiam momentui geriausias laidininkas tarp analogiškų, nes pasižymi išskirtiniu stipriu ir laidumu. Jų stipris siekia 1100–1500 MPa (paprasto Cu laidininko – 270 MPa), takumo riba – 850 MPa, elektrinis laidumas – 67–70 % IACS. Todėl Cu-Nb mikrokompozitai laikomi vieni iš perspektyviausių



5 pav. Pažangių konstrukcinių medžiagų ir kompozitinių laidininkų mechaninės savybės (Shneerson *et al.* 2006)

Fig. 5. The mechanical properties of advanced structural materials and composite conductors (Shneerson *et al.* 2006)



6 pav. Cu-Nb laido skerspjūvis (gaminami kelių skerspjūvių 2×3 mm, 3×5,8 mm, 4×6 mm) (Shikov *et al.* 2002)

Fig. 6. Cu-Nb wire cross-section (can be produced with several cross-section 2×3 mm, 3×5,8 mm, 4×6 mm) (Shikov *et al.* 2002)

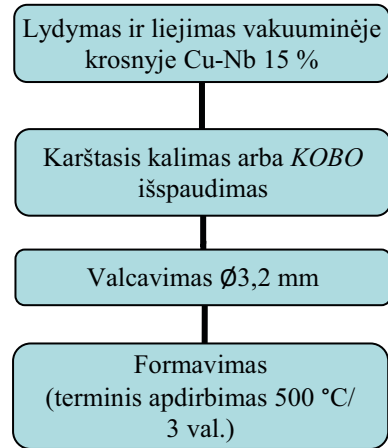
ir tinkamiausių iš šiuo metu egzistuojančių medžiagų stiprių magnetinių laukų impulsinėms sistemoms. Neseniai pradėta jų smulkiaserijinė gamyba, tokių laidų metinė gamybos apimtis siekia iki 50 t per metus. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų struktūra sudaryta iš varinės matricos, kurioje įkomponuotos labai plonos niobio gijos. Nb gijos sutvirtina varinę matricą, kuri užtikrina didesnę laidininko stiprį ir netrukdo elektronams judėti, t. y. elektros srovei tekėti (6 pav.) (Shikov *et al.* 2002).

### Cu-Nb kompozitinių laidininkų gamybos ypatumai

CuNb laidininkų gamyba sudėtinga, didelio tikslumo ir nuoseklumo reikalinga technologija. Šiuo metu Cu-Nb kompozitiniams laidininkams gaminti taikomos dvi gamybos technologijos:

1. Skirtingo mechaninio stiprio medžiagų sulydymas į mikro- arba nanokompozitą – *in situ* metodas (Leprince-Wang *et al.* 2003).
2. Gero laidumo laidininkų gijų suvijimas su mechaniškai labai stiprios medžiagos gijomis į vieną mikro- arba nanokompozitinį laidininką (Shikov *et al.* 2002).

Pirmuoju atveju laidų gamybos procesas „lydymas – deformacija“ (*in situ*) panašus į tradicinę metalinių lynų gamybos technologiją. *In situ* proceso etapai pateikti 7 pav. Grynas varis ir niobis išlydomi tam tikra proporcija. Iš gauto vakuuminio lydymo metu Cu-Nb liejinio (struktūrą sudaro smulkūs Nb dendritai Cu matricoje) ekstruzijos būdu gaminami 20–50 mm strypai. Šie ruošiniai keliais etapais deformuojami iki reikalingo skersmens vielos. Taip daug kartų ištempiant CuNb lydinio vielą įmanoma pagaminti labai mažo skersmens gijas (iki 90 μm). *In situ* Cu-Nb kompozito struktūra: Nb plaušai Cu metalinėje matricoje. Šios gijos vėliau įvelkamos į Cu šarvą (Gluchovski *et al.* 2014). Toks kompozitinio kabelio stipris labai didelis. Jo stiprumo riba gali siekti 1 GPa, o elektrinis laidumas – 60–70 % IACS.

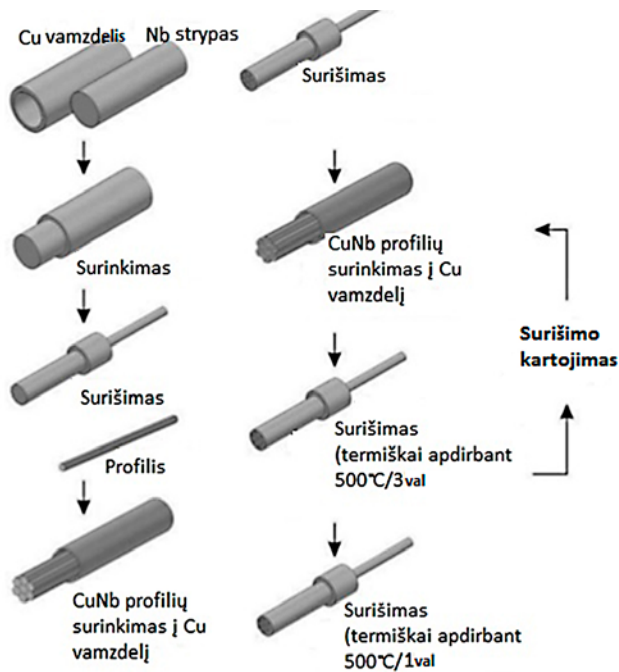


7 pav. CuNb mikrokompozito gamyba *in situ* metodas (Gluchovski *et al.* 2014)

Fig. 7. Processing of CuNb microcomposites *in situ* method (Gluchovski *et al.* 2014)

Kitas kompozitinių laidininkų gamybos būdas „suirinkimas–deformacija“ panašus į bimetalių gamybą. Cu vamzdelių ir Nb strypų suvijimas stipraus daugkartinio deformavimo būdu. Pirmame etape paruošiami Cu vamzdeliai ir Nb strypų ruošiniai. Naudojamos taip pat techninio grynumo žaliavos, ruošinių matmenys turi būti labai tikslūs. Todėl vamzdeliai ir strypai dažniausiai kalibruojami. Kitame etape Nb strypai įdedami į Cu vamzdelį ir valcuojama, Cu ir Nb ruošiniai sujungiami. Trečiame etape keli supresuoti CuNb kompozitiniai ruošiniai įdedami į Cu vamzdelį ir vėl kartotinai valcuojama. Ketvirtame etape gauti ruošiniai vėl įdedami į Cu vamzdelį ir vėl valcuojama, jie išlaikomi 3 valandas 500 °C temperatūroje. Šį etapą reikia kartoti tiek kartų, kol gaunamas reikiamos struktūros mikrokompozitas (Oguro *et al.* 2013). Mikrokompozito struktūra: Nb gijos <15 nm ir vario matrica, atstumas tarp Nb gijų <60 nm. Paskutiniame etape gautas ruošinys dar kartą valcuojamas iki reikalingo skerspjūvio (nuo 0,01 iki 125 mm<sup>2</sup>) ir išlaikomas 1 valandą 500 °C temperatūroje. 2×3 mm skersmens Cu-Nb laidininke yra apie 400 mln. Nb gijų. Mikrokompozitinių laidininkų gamybos etapai, kai į Cu vamzdelį dedama po septynis Nb strypus, pateikiami 8 pav. (Rdzawski *et al.* 2015), o Nb gijų kiekio priklausomybė nuo laido deformavimo etapų kiekio pateikta 1 lentelėje (Gluchovski *et al.* 2011).

Pagrindinis pirmu būdu gaminamų Cu-Nb laidininkų trūkumas – sunkumai suvynioti magnetinę ritę ar juos lankstyti dėl didesnio trapumo. Antru būdu gaminami laidininkai gali būti lankstomi, sunkiau lūžta lankstant, jų stiprumo riba siekia 1,5 GPa, elektrinis laidumas – 65–75 % IACS. Šių laidininkų savybes dar tikimasi pagerinti iki 2 GPa stiprio, nebloginant elektrinio laidumo (Shikov *et al.* 2002).



8 pav. CuNb mikrokompozitų gamyba (surišimo metodas) (Rdzawski *et al.* 2015)

Fig. 8. Processing of CuNb microcomposites (bundling method) (Rdzawski *et al.* 2015)

1 lentelė. Nb gijų skaičiaus priklausomybė nuo laido pasikartojančių deformavimo etapų skaičiaus (Gluchovski *et al.* 2011)  
Table 1. Changes of niobium content and niobium fibres number during repeated bundling process (Gluchovski *et al.* 2011)

Deformacijų skaičius	Nb kiekis %	Nb gijų skaičius
1	47	7
2	36	49
3	30	343
4	24	2 401
5	19	16 807
6	15	117 649
7	12	823 543

Pagrindiniais tokių superstiprių laidininkų vartotojais taps aviacija, kosmonautika, greitasis geležinkelio transportas, branduolinė, šiluminė ir alternatyvioji energetika ir mokslo centrai. Cu-Nb kompozitai laikomi vieni tinkamiausių medžiagų ateities elektros transformatoriams, stiprių magnetinių laukų sistemoms, variklių rotoriams, didelės galios elektros linijoms, indukcinio suvirinimo įrangai arba technologinei įrangai, jie skirti gaminių deformacijai magnetiniu būdu.

### Galimybės sujungti mikrokompozitinius laidininkus

Įvairių superlaidžių ir stiprių magnetinių laukų sistemų konstrukciniai sprendiniai numato daugumą jungčių tarp magnetų modulių / sekcijų (Blumber *et al.* 2010). Jungtys

privalo būti ir dėl mikrokompozitinių laidininkų ribotų lankstymo galimybių, dėl magnetų soleinodų modulinės struktūros ir dėl būtinybės palikti galimybę remontuoti tokias brangias ir sudėtingas konstrukcijas, išardyti reikiamą dalį magnetų ir pakeisti tik sugedusias magnetų dalis. Magnetinių ričių sekcijų arba išvadų laidininkų jungtys neturi būti silpniausia vieta. Analogiškos problemos bus ir taikant šiuos laidus didelės galios elektros linijose, kur taip pat kils poreikis patikimai sujungti laidų galus. Kompozitinių laidininkų struktūra, sujungiant juos lydomo suvirinimo būdu, iš dalies pažeidžiama arba modifikuojama (Ciazynski *et al.* 2001). Todėl dauguma tradicinių lydomojo suvirinimo metodų nepritaikoma kompozitinėms medžiagoms, nes išsilydant matricai vyksta negrįžtamieji struktūros pokyčiai. Šią problemą išspręsti hipotetiškai įmanoma slėginio, difuzinio suvirinimo būdu, taip pat kitus specialius suvirinimo ar giminingus procesus. Mikrokompozitų gamybos procesas analogiškas difuziniam ar slėginiam suvirinimui. Cu-Nb kompozitas formuojamas mechaninio apdirbimo spaudimo būdu dėl medžiagų plastinės deformacijos. Šiame procese deformuojamieji paviršiai priartėja iki tarpatominių ryšių atstumo ir susivirina. Todėl tokiu principu gaunamos virintinės jungtys, o tokios suvirinimo technologijos gali būti taikytinos ir šiuo atveju. Taip pat atliekami moksliniai tyrimai bei bandymai pritaikyti ir kitas specialias technologijas mikrokompozitiniams laidininkams sujungti. Šiuo metu jau galima rasti informacijos apie superlaidžių NbSn, NbTi ir kitų analogiškų mikrokompozitinių laidininkų litavimo su PbSn lydmetaliu ir elektronpluoščio suvirinimo bandymų rezultatus bei šių technologijų taikymą ITER projekte (Ciazynski *et al.* 2001). Bandymai, siekiant atlikti Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų kontaktinį suvirinimą ir litavimą, buvo daromi ir Lietuvoje (Višniakov *et al.* 2011). Kontaktiniu būdu virintinės ir lituotinės jungtys pasižymėjo kur kas mažesniu mechaniniu stipriu nei mikrokompozitinė viela. Geresnėmis savybėmis pasižymėjusių lituotinių jungčių stiprį lėmė lydmetaliu ir gilzių medžiagos mechaninės savybės. Šiuo metu VGTU Suvirinimo tyrimų ir diagnostikos mokslo laboratorijoje, bendradarbiaujant su Stiprių magnetinių laukų institutu, vykdomi moksliniai tyrimai siekiant įvertinti kitų specialių suvirinimo technologijų potencialą ir pritaikymą Cu-Nb laidininkams sujungti. Siekiama gauti neardomas jungtis su artimomis sujungiamiesiems mikrokompozitams savybėmis.

### Išvados

Atliktų mokslinių darbų, teorinių pagrindų ir eksperimentinių tyrimų rezultatų apžvalga rodo, kad išsamių duomenų ir eksperimentinių tyrimų rezultatų apie Cu-Nb

mikrokompozitų suvirinimo galimybes dar nepakanka. Tačiau problema ir poreikis turėti patikimą ir praktišką mikrokompozitinių laidininkų sujungimo technologiją tapo svarbi stiprių magnetinių laukų sistemų kūrėjams. Todėl moksliniai tyrimai šioje srityje labai aktualūs.

## Literatūra

- Blumber, L.; Hasizume, H.; Ito, S.; Minervini, J.; Yanagi, N. 2010. *Status of high temperature superconducting magnet development*. RSFC/JA-10-45 report. 3 p.
- Ciazynski, D.; Duchateau, J.; Decool, P.; Libeyre, P.; Turck, B. 2001. Large superconductors and joints for fusion magnets: from conceptual design to testing at full scale, *Nuclear Fusion* IAEA 41(2): 223–226. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/41/2/309>
- Gluchovski, W.; Stobrawa, J.; Rdzawski, Z.; Maszowski, K. 2014. Microstructure and properties of Cu-Nb wire composites, *Archives of Metallurgy and Materials* 59(1): 35–40.
- Gluchovski, W.; Stobrawa, J.; Rdzawski, Z.; Maszowski, K. 2011. Mikrostruktural characterization of high strength high conductivity Cu-Nb microcomposite wires, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 46(1): 40–49.
- Herlach, F.; Miura, N. 2003. *High magnetic fields. Science and technology*. Vol. 1. Magnet technology and experimental techniques. London: Imperial College Press. 336 p. <https://doi.org/10.1142/4764-vol1>
- Kindo, K. 2006. New pulsed magnets for 100 T, long-pulse and diffraction measurements, *Journal of Physics* 51: 522–528. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/51/1/118>
- Leprince-Wang, Y.; Han, K.; Huang, Y.; Yu-Zhang, K. 2003. Microstructure of Cu-Nb microcomposites, *Material Science and Engineering* A351: 214–223. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00855-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00855-9)
- Oguro, H.; Avaji, S.; Watanabe, K.; Sugimoto, M. 2013. New fabrication process of Cu-Nb composite for internal reinforcement of Nb<sub>3</sub>Sn wires, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 26: 2099–2101. <https://doi.org/0.1007/s10948-012-2031-1>
- Rdzawski, Z.; Gluchovski, W.; Stobrawa, J.; Kempinski, W.; Andrzejewski, B. 2015. Microstructure and properties of Cu-Nb and Cu-Ag nanofiber composites, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15: 689–697. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.12.002>
- Shikov, A. K.; PANTSyrnyi, V.; Vorobeva, A.; Sudev, S.; Khlebova, N.; Silajev, A.; Belyakov, N. 2002. Copper-niobium high strength and high conductivity winding wires for pulsed magnets, *Material Science and Heat Treatment* 44(11): 491–495. <https://doi.org/10.1023/A:1022504805662>
- Shneerson, G. A.; Dolotenko, M. I.; Krivosheev, S. I. 2006. *Strong and superstrong pulsed magnetic fields generation*. De Gruyter Studies in Mathematical Physics. De Gruyter, 147–178.
- Sorbom, B. N.; Ball, J.; Palmer, T. R.; Mangiarotti, F. J.; Sierchio, J. M.; Bonoli, P.; Kasten, C.; Sutherland, D. A.; Barnard, H.S.; Haakonsen, C. B.; Goh, J.; Sung, C.; Whyte, D. G. 2015. ARC: a compact, high-field, fusion nuclear science facility and demonstration power plant with demountable magnets, *Fusion Engineering and Design* 100(November): 378–405. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.07.008>
- Spahn, E.; Loffler, M.; Balevičius, S. 2011. European laboratories for Pulsed power research, *Journal of Korean Physical Society* 59(6): 3594–3598.
- Suzuki, O.; Sakamoto, K.; Imanaka, Y.; Kido, G. 2001. Fabrication of pulsed magnets with a linear-type coil-winding machine, *Physica B* 294–295: 661–664. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(00\)00739-0](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(00)00739-0)
- Tesanovic, Z. 2013. *High magnetic field science and its application in the US: current status and future directions*. Washington D.C.: National academies press. 10 p.
- Višniakov, N.; Novickij, J.; Ščekaturovienė, D.; Petrauskas, A. 2011. Quality analysis of welded and soldered joints of Cu-Nb microcomposite wires, *Materials Science* 17(1): 16–19. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.17.1.242>

## ANALYSIS OF MICROCOMPOSITE CU-NB CONDUCTORS CHARACTERISTICS AND POSSIBILITY OF THEIR JOINING

G. Mikalauskas, N. Višniakov, R. Lukauskaitė, J. Škamat

### Abstract

High magnetic fields systems is widely used in fundamental and applied research in various branches of science and industry. The most famous examples of such magnetic systems are tokomaks, stellers, superconducting magnets, CERN collider, ITER reactor, levitation systems. The key component of magnetic systems is inductor (solenoid). At this moment, the record magnetic fields reaches 100 T. The creation of a strong magnetic field is no longer enough just to improve designs for inductor (solenoid). Traditional electrotechnical materials and conductors can no longer withstand the huge mechanical and thermal loads, therefore, they change to an entirely new advanced materials, for example Cu-Nb microcomposite conductors. These materials are characterized by a unique structure, excellent mechanical properties and good electrical conductivity. One of the most important and unresolved problems of high magnetic fields systems are reliable non-destructive joints and joining technologies creation. This paper reviews the strong magnetic fields systems design features, Cu-Nb conductors characteristics and structure, microcomposite conductor production specifics, application fields, joining problems and the available joining technologies.

**Keywords:** Cu-Nb conductors, microcomposites, welded joints.