

Mechanics and materials engineering Mechanika ir medžiagų inžinerija

CU-NB 18 % MIKROKOMPOZITINIO LAIDININKO IR JO VIRINTINIŲ JUNGČIŲ ELEKTRINIO LAIDUMO IR SAVITOSIOS ELEKTRINĖS VARŽOS MATAVIMO YPATUMAI

Paulius BEINORAS , Nikolaj VIŠNIAKOV

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

- gauta 2023 m. gegužės 8 d.
- priimta 2023 m. lapkričio 23 d.

Saulyka. Šiuolaikiniuose fundamentiniuose, taikomuosiuose tyrimuose bei inovatyviausiuose industriniuose procesuose yra plačiai taikomi stiprių magnetinių laukų sistemos. Šie įrenginiai generuoja magnetinius laukus, kurie siekia 5–100 T, o laidininkai yra veikiami didžiulės Lorentzo jėgos, todėl laidininkų medžiaga turi būti itin tvirta ($UTS \geq 700$ MPa) ir turėti gerą savitąjį elektrinį laidumą ($IACS \geq 60$ %). Kadangi tradiciniai laidininkai tokie kaip varis, aliuminis, auksas, sidabras negali atlaikyti tokių apkrovų, buvo sukurtos mikrokompozitinės medžiagos, kurios pasižymi dideliu stipriu ir turi gerą savitąjį elektrinį laidumą. Šiame darbe apžvelgiamos laidininkų savitojo elektrinio laidumo bei savitosios elektrinės varžos charakteristikos, jiems įtaką darantys veiksniai, šių elektrinių charakteristikų matavimo metodikos, *Cu-Nb 18 %* mikrokompozitinio laidininko savybės. Taip pat šiame darbe yra aprašomos *Cu-Nb 18 %* mikrokompozitinio laidininko su virintine jungtimi (pagaminta taikant sandūrinį kontaktinį suvirinimą) ir vientiso *Cu-Nb 18 %* laidininko savitojo elektrinio laidumo ir savitosios elektrinės varžos matavimo metodikos, atliktas metodikų taikymo galimybių ir gautų charakteristikų palyginimas.

Reikšminiai žodžiai: elektrinis laidumas, savitoji elektrinė varža, Cu-Nb mikrokompozitiniai laidininkai, virintinės jungtys, matavimai.

✉ Autorius susirašinėti. El. paštas paulius.beinoras@vilniustech.lt

1. Įvadas

Stiprių magnetinių laukų technologijų taikymas pramonėje, energetikoje, medicinoje, diagnostikoje ir fundamentiniuose moksluose tampa vis įvairesnis ir svarbus. Perspektyviausi ir esant tarptautinei kooperacijai įgyvendinami didžiausieji šiuolaikiniai fundamentinių tyrimų ir „žaliosios“ energetikos projektai nebūtų įmanomi be šių technologijų. Tarp stiprių magnetinių technologijas ir įrenginius taikančių pasaulyje žinomų projektų galima įvardinti tokius kaip CERN laboratorijos didysis hadronų priešpriešinių srautų greitintuvas (angl. *Large Hadron Collider*, LHC), *Helion Energy* branduolių sintezės tyrimų bendrovės branduolių sintezės reaktorai *Trenta* ir *Polaris*, eksperimentinis branduolių sąlajos reaktorius (angl. *International Thermonuclear Experimental Reactor*, ITER), programa Jungtinis Europos Torus (angl. *Joint European Torus*, JET), kiti stelaratoriai bei tokamakai.

Tam, kad tokie unikalūs įrenginiai galėtų generuoti stiprius magnetinius laukus, galinčius siekti 5–100 T, laidininkų medžiagos, iš kurių yra pagaminti šių įrenginių solenoidai, turi pasižymėti itin aukštu laidininko medžiagos mechaniniu stipriu ($UTS \geq 700$ MPa), kad atlaikytų

laidininką veikiančią Lorentzo jėgą, taip pat šios medžiagos turi būti pakankamai plastiškos. Be to, laidininkai turi pasižymėti ir geru elektriniu laidumu – $IACS \geq 60$ % (angl. *IACS – International Annealed Copper Standard* – gryno vario laidumo etalonas) ir maža savitąja varža, kad laidininkas neperkaistų ir nepasikeistų jo elektrinės savybės (Blaschke et al., 2022). Tradiciniai metaliniai laidininkai dėl savo mažo mechaninio stiprio stipriuose magnetiniuose laukuose jau negali būti pritaikomi. Šiuo tikslu buvo sukurtos naujos kompozitinės medžiagos, kurios turi aukštą stiprį bei gerą, panašų į vario lydinis, elektrinį laidį. Tokių medžiagų pavyzdžiai yra *Cu-Nb*, *Cu-Ta*, *Cu-Ag*, *Cu-W* sisteminė mikrokompozitiniai laidininkai. Su šiomis mikrokompozitinėmis medžiagomis buvo atlikta daug tyrimų, siekiant išsiaiškinti, kaip medžiagos mikrostruktūra veikia jų stiprį ir elektrinį laidumą (Yamada et al., 2018; Zhao et al., 2022; Lemos et al., 2022). Gauti tyrimų duomenys leido nustatyti optimalią mikrokompozitinių medžiagų sudėtį. Gaminami ir rinkoje jau tapo prieinami (nors dar ir ribotai dėl mažos gamybos apimtys) įvairaus skersmens mikrokompozitiniai *Cu-Nb 18 %* laidininkai. Tokių laidininkų stiprumo riba gali siekti 1 GPa, o elektrinis laidumas – 60–70 % IACS.

Įvairių superlaidžių ir stiprių magnetinių laukų sistemų konstrukciniai sprendiniai numato daugumą jungčių tarp magnetų modulių ar sekcijų. Šios jungtys neturi būti silpniausia ir pasižyminti prastėmis elektrinėmis savybėmis vieta.

Cu-Nb 18 % ir kitų mikrokompozitinių laidininkų suvirinimo ar litavimo tyrimai ir bandymai jau buvo daromi įvairiose mokslinėse laboratorijose, taip pat ir Lietuvoje (Višniakov et al., 2011; Mikalauskas et al., 2016). Jau publikuotų tyrimų rezultatų apžvalga rodo, kad išsamių duomenų ir eksperimentinių tyrimų rezultatų apie Cu-Nb 18 % mikrokompozitinių jungčių elektrines charakteristikas ir jų nustatymo metodikas dar nepakanka. Tačiau problema ir poreikis turėti patikimą ir praktišką mikrokompozitinių laidininkų sujungimo technologiją ir tiksliai žinoti jų eksploatacines charakteristikas tapo itin svarbi stiprių magnetinių laukų sistemų kūrėjams. Todėl moksliniai tyrimai šioje srityje lieka labai aktualūs.

2. Mikrokompozitinių laidininkų elektrinių charakteristikų vertinimo ypatumai

Taikomieji ir fundamentiniai moksliniai tyrimai vykdomi, bandant sukurti ir pritaikyti moderniose ir perspektyviose elektromagnetinėse sistemose naujas mikrokompozitines medžiagas, kurios atlaikytų vis didėjančias apkrovas, kurios indukuojamos itin stiprių magnetinių laukų sistemose (Bartkevičius & Novickij, 2009). Tokiu būdu siekiama padidinti unikalių ir labai brangių sistemų ir jų svarbiausių komponentų – induktorių efektyvumą ir patikimumą.

Elektros laidininkų svarbiausios elektrinės charakteristikos yra maža savitoji elektrinė varža ρ ir geras savitasis elektrinis laidumas σ . Metalams yra būdingas elektroninis laidumo tipas, kai krūvininkai yra laisvieji elektronai (Zhuiykov, 2018).

Elektrinis laidumas priklauso nuo medžiagos savybių. Metaluose elektrinį laidumą veikia daug faktorių:

- Atominė struktūra. Metalai yra geri elektros laidininkai ($\sigma > 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$), bet jų elektrinis laidumas priklauso nuo elektronų mobilumo aplink teigiamus metalo jonus, o tai kiekvienam metalui atskirai nusako laisvųjų elektronų kiekis išoriniame atomo sluoksnyje (Awan et al., 2020).
- Temperatūra. Kai metalo temperatūra didėja, teigiamai jona metalo įgauna daugiau energijos ir jų chaotiškų virpesių amplitudė padidėja, elektronai daugiau išsklaidomi. Dėl šios priežasties sumažėja elektrinis laidumas (Bass, 2022).
- Priemaišos sudėtyje ir jų kiekis. Skirtingų cheminių elementų atomai laidininke gali sumažinti savitąjį elektrinį laidumą, nes įsiterpę kristalinėje gardelėje atomai maišo judėti laisviesiems elektronams, padidina elektronų sklaidą (Sundqvist, 2022).
- Mechaniniai įtempiai. Mechaniniai gniuždymo arba tempimo įtempiai veikia metalo kristalinę gardelę ir gali sukelti medžiagos struktūros lokalius pokyčius ir vietinius vidinius įtempius. Šie pokyčiai sudaro

papildomas kliūtis elektronų judėjimui ir pasireiškia kaip laisvųjų elektronų tankio padidėjimas įtempių koncentracijos vietose (Adesakin, 2016).

- Aplinkos slėgis. Padidinus aplinkos slėgį natūraliai gali pakisti ir medžiagos tankis. Dėl šios priežasties atsiranda ir didesnis kiekis laisvųjų elektronų mažesniame medžiagos tūryje (Fickett, 1982).

Tarptautinė elektrotechnikos komisija 1914 m. nustatė, kad gryno vario elektrinis laidumas gali būti naudojamas kaip etalonas matuojant ir lyginant kitų laidžių medžiagų laidumą. Savitasis elektrinis laidumas SI sistemoje matuojamas $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ (simensas į metrą) arba IACS (angl. *International Annealed Copper Standard*) (United States Department of Commerce, 1914). Atkaitinto vario standarto elektrinis laidumas $20 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje yra lygus $0,58 \cdot 10^8 \text{ S/m}$ ir tai atitinka 100 % IACS.

Elektrinis laidumas – tai dydis, atvirkščias savitajai elektrinei varžai (Bass, 2022).

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, \quad (1)$$

čia σ – elektrinis laidumas ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$); ρ – savitoji elektrinė varža ($\Omega \text{ m}$).

Vienalyčių laidininkų pastovaus skerspjūvio varža priklauso nuo laidininko medžiagos savybių, jo ilgio, skerspjūvio ir jo geometrijos. Bendruoju atveju ji apskaičiuojama pagal formulę (Bass, 2022):

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot S}, \quad (2)$$

čia R – laidininko varža (Ω); σ – savitasis elektrinis laidumas ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$); S – laidininko skerspjūvio plotas (m^2); l – bandinio ilgis (arba atstumas tarp įtampą matuojančių gnybtų, m).

Savitoji elektrinė varža (ρ) – skaliarinis dydis, kuris lygus vienetinio ilgio ir vienetinio skerspjūvio ploto vienalyčio cilindrinio skerspjūvio laidininko varžai. Kiekviena medžiaga turi skirtingą savitąją varžą. Savitosios elektrinės varžos vienetas SI sistemoje yra $\Omega \text{ m}$.

Savitoji metalinių laidininkų varža yra tiesiškai priklausoma nuo temperatūros, t. y. ji didėja kylant temperatūrai:

$$\rho_{t_2} = \rho_{t_1} [1 + \alpha (t_2 - t_1)], \quad (3)$$

čia ρ_{t_2} – savitoji varža $t_2 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje; ρ_{t_1} – savitoji varža $t_1 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje; α – temperatūrinis varžos koeficientas; t_1 – pradinė temperatūra $^\circ\text{C}$; t_2 – galutinė temperatūra $^\circ\text{C}$.

Tradicinių laidininkų, tokių kaip varis, aliuminis, auksas, sidabras, savybes apriboja jų taikymo galimybės stiprių magnetinių laukų srityje. Jų gamybos technologijos ir metodikos, taikomos mechaninėms ir elektrinėms savybėms užtikrinti, šiuo atveju tampa neefektyvios. Dažniausiai metaliniuose laidininkuose vidiniams įtempiams pašalinti ir elektrinėms charakteristikoms gerinti yra taikomas papildomas terminis apdorojimas, toks kaip atleidimas. Tokios metodikos leidžia užtikrinti geras elektrines charakteristikas, bet nedidina mechaninio stiprio (Chu et al., 2023).

Šaltasis metalų apdirbimas neretai taikomas metalams sukietinti ir stiprumui padidinti, tačiau tokia technologija

taip pat paveikia metalinių laidininkų kristalinę struktūrą, tai veikia laisvųjų elektronų judėjimą ir padidina jų savitąją elektrinę varžą. Be to, tokios metodikos vis tiek neleidžia itin padidinti tradicinių laidininkų mechaninio stiprio (Çetinarlan, 2009).

Minėtų trūkumų neturi šiuolaikiniai mikrokompozitiniai laidininkai. Mikrokompozitinio laidininko struktūroje yra 2 skirtingai metalai: metalinė matrica ir sustiprinančioji fazė. Tačiau naujos kartos kompozitinių laidininkų savybės dėl jų nevienalytės struktūros ir jų sudedamųjų savybių skirtumų nėra lengva nustatyti ar apskaičiuoti vadovaujantis prieš tai pateiktomis bazinėmis formulėmis.

Šiuo atveju kompozitinių laidininkų elektrinės savybės (elektrinis laidumas ir savitoji varža) kaip ir kitų kompozitinių medžiagų savybės gali būti teoriškai apskaičiuojamos pagal mišinių taisyklę (Kozlenkova et al., 1996):

$$F = f F_f + (1 - f) F_m; \quad (4)$$

$$f = \frac{V_f}{V_f + V_m}, \quad (5)$$

čia f – kompozitinės medžiagos sustiprinimo fazės tūrio dalis; F_f – kompozitinės medžiagos sustiprinimo fazės savybė; F_m – kompozitinės medžiagos matricos savybė.

Ši bazinė taisyklė kompozitinių medžiagų inžinerijoje leidžia teoriškai apskaičiuoti tokias kompozitinių medžiagų savybes kaip tamprumo modulis, tankis, stipris, šiluminis ar elektrinis laidumas. Tuomet kompozitinio laidininko elektrinis laidumas gal būti apskaičiuotas pagal tokią formulę (Uvarov, 2000):

$$\sigma = f \sigma_f + (1 - f) \sigma_m, \quad (6)$$

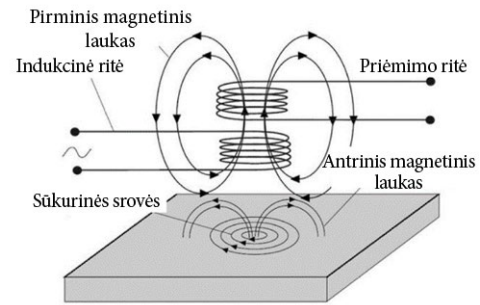
čia f – kompozitinio laidininko Nb sustiprinimo fazės tūrio dalis; σ_f – kompozitinio laidininko Nb sustiprinimo fazės elektrinis laidumas, σ_m – kompozitinio laidininko Cu matricos elektrinis laidumas.

3. Metalinių laidininkų elektrinio laidumo ir savitosios varžos matavimo metodikos

Elektrinio laidumo matavimai praktikoje atliekami ne tik medžiagų elektrinėms charakteristikoms įvertinti, bet ir kitais tikslais: struktūriniais ir vidiniams defektams nustatyti, lydiniams ir liejiniams identifikuoti ir rūšiuoti, terminio apdorojimo kokybei įvertinti, priemaišų neleidžiamajai koncentracijai identifikuoti, sritims su vidinių mechaninių įtempių koncentracija nustatyti ir panašiai (Bowler & Huang, 2005).

Vienas iš plačiausiai taikomų praktikoje metalų elektrinio laidumo matavimo būdų yra pagrįstas sūkuriniu srovų metodikos (ET) taikymu (1 pav.), ji neretai pasitelkiama metalų gaminių ir jungčių neardomajai kontrolei. Šis kontrolės metodas nereikalauja sudėtingo paviršių paruošimo ir leidžia keičiant taikomą darbinio dažnio diapazoną koreguoti tyrimo gylį bandomajame objekte (Rizzo et al., 2014).

Elektrinio laidumo matavimai gali būti vykdomi pagal standartinę metodikas, pavyzdžiui, ASTM E1004-17



1 paveikslas. Sūkurinių srovių metodo principas

(2017), *Standartiniai bandymai elektriniam laidumui nustatyti, taikant elektromagnetinę (sūkurinių srovių) metodą.*

Elektrinio laidumo matavimams taikant sūkurinių srovių metodą, matavimo prietaisui reguliuoti ir kalibruoti naudojami specialūs kalibravimo etalonai (laidžių medžiagų pavyzdžiai).

Šiuo metu yra dviejų tipų elektrinio laidumo etalonai: 1) Fizinio ir techninio federalinio instituto (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) etalonai, kurių charakteristikos buvo pagrįstos taikant matavimuose nuolatinę srovę (DC).

2) Nacionalinės fizikos laboratorijos (National Physical Laboratory, NPL) etalonai, pagrįsti taikant matavimuose kintamąją srovę (AC).

PTB etalonuose savitoji elektrinė varža (atvirkščiai proporcinga elektriniam laidumui) vertinama pagal įtampos kritimą tekant nuolatinėi srovei (DC) konkrečios medžiagos bandinyje (kuris yra tam tikro skerspjūvio ploto ir ilgio). Tokiu būdu matuotas laidumas atitinka tam tikro konkrečios medžiagos tūrio vidutinę laidumo vertę. Galimas medžiagos nehomogeniškumas suvidurkinamas visame tūryje. Norint tiesiogiai pritaikyti tokiu būdu gautą medžiagos elektrinio laidumo vertę prietaiso kalibravimui ir matavimams, matavimų objektai turi atitikti šiuos reikalavimus:

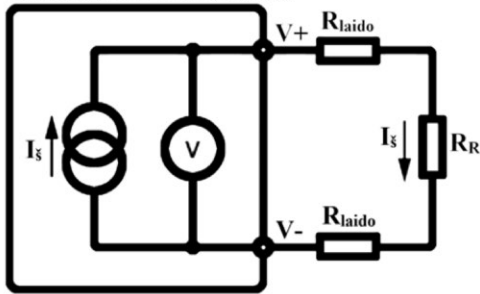
- medžiaga turi būti visiškai vienalytė ir izotropinė;
- paviršinis sluoksnis turi turėti tokį patį laidumą kaip ir visa medžiaga.

Šios pagrindinės sąlygos sunkiai įgyvendinamos praktikoje, nes net tradiciniuose laidinukuose dėl gamyboje taikomų technologinių procesų (valcavimo, presavimo ar paviršiaus apdorojimo) įtakos medžiagos savybės gali labai skirtis skirtingomis kryptimis.

Taikant kitą tikslesnį elektros laidumo matavimo būdą yra panaudojamas homogeninis kintamas magnetinis laukas, pavyzdžiui, taikant toroidinę ritę ir kintamąją elektros srovę (AC). Medžiagos elektros laidumą galima apskaičiuoti pagal įterptos į magnetinį lauką medžiagos elektrinio impedanso pokytį, taikytus elektrinius parametrus ir ritės geometriją.

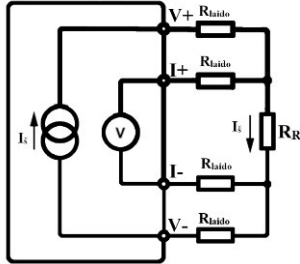
Metalų savitosios elektrinės varžos matavimui praktikoje taikomos kelios metodikos: 2 taškų arba 4 taškų matavimo metodai (2, 3 pav.). Pirmuoju atveju medžiagos savitoji varža nustatoma išmatuojant stačiakampio pavyzdžio

Skaitmeninis multimetras



2 paveikslas. Dviejų taškų savitosios elektrinės varžos matavimo schema

Skaitmeninis multimetras



3 paveikslas. Keturių taškų savitosios elektrinės varžos matavimo schema

(kurio ilgis l , aukštis h ir plotis w) elektrinę varžą, juo teka nuolatinė elektros srovė. Strypo savitoji varža tuomet apskaičiuojama pagal (2) lygtį. Dėl gana mažo tikslumo ši metodika retai taikoma atliekant mokslinius tyrimus, ypač tais atvejais, kai laidininko varža yra labai maža arba labai didelė.

Moksliniuose tyrimuose savitajai elektrinei varžai matuoti dažniausia yra pritaikoma 4 taškų matavimo metodika, dar vadinama varžos matavimu panaudojant „Kelvino tiltą“ (Valdes et al., 1954). Šis metodas tinka ne tik kietųjų kūnų, bet ir plonų plėvelių elektrinėms charakteristikoms nustatyti. Šis metodas pasižymi dideliu tikslumu, leidžia išmatuoti mažas varžas ir nereikalauja kruopštaus bandinio paruošimo (Li et al., 2012). Skirtingai nei 2 taškų metodikoje, kur yra naudojami tik du laidai ir kontakto taškai, šiuo atveju du laidai naudojami srovei tiekti ir matuoti, o kitais dviem laidais matuojamas įtampos kritimas (3 pav.). Laidininko savitoji varža tuomet apskaičiuojama pagal (7) lygtį:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad (7)$$

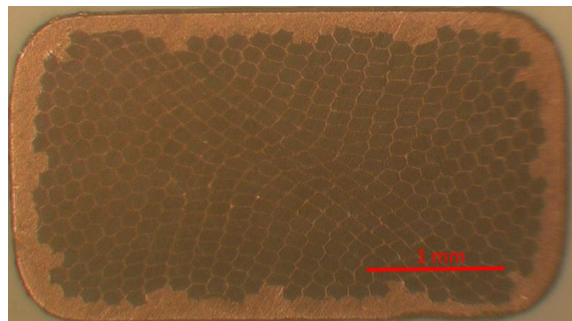
čia R – bandinio varža; S – bandinio skerspjūvio plotas; l – bandinio ilgis.

Matavimo keturiuose taškuose principu taip pat yra grindžiamas ir Van Der Pauw metodas (Ramadan et al., 1994). Šis metodas gali būti taikomas įvairių formų medžiagoms, tačiau jos turi turėti vienodą storį visame tiriamojo objekto perimetre ir būti izotropiškos bei homogeniškos. Metodas taip pat netinka ir mažo skersmens bandiniams (Stricker, 1968).

Savitosios elektrinės varžos matavimai gali būti vykdomi pagal standartines metodikas, pavyzdžiui, ASTM B193-20 (2020), *Standartinis elektrai laidžių medžiagų bandymų metodas elektrinei varžai nustatyti*.

4. Tyrimo objektas

Tyrimuose naudojamas $4,2 \times 2,4$ mm skersmens Cu-Nb 18 % mikrokompozitinis laidininkas (4 pav.), kuriame Nb gijų skersmuo < 15 nm (Filgueira et al., 2001). Tokio Cu-Nb 18 % laidininko tempimo stipris R_m siekia 1100–1500 MPa, takumo riba R_e – 850 MPa, santykinis pailgėjimas S – 4,2 % (Mikalaszkas et al., 2020), elektrinis laidumas $\sigma \sim 65$ % IACS (Bartkevičius & Novickij, 2009). Tyrimo objektu buvo šio laidininko fragmentai ir jo virintinės jungtys, kurios buvo pagamintos taikant kontakcinį sandūrinį suvirinimo būdą.



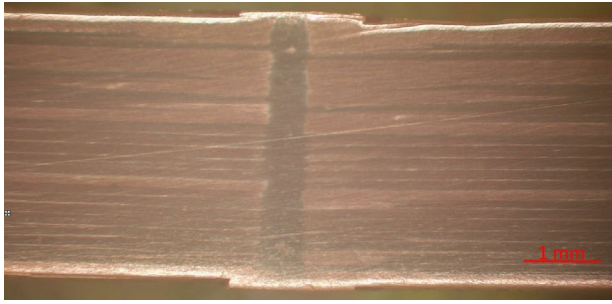
4 paveikslas. Cu-Nb 18 % mikrokompozitinio laido struktūra

5. Tyrimų metodika

Sandūrinis suvirinimas buvo atliktas panaudojant sandūrinio suvirinimo mašiną MKCCO (Chaika, Ukraine) (1 lentelė) su bekontakčiu infraraudonųjų spindulių pirometru S-HW550 (Century Harvest Electronics Co, Limited, Kinija). Kontroluojamos temperatūros diapazonas 50–2200 °C, tikslumas ± 2 %, skiriamoji geba 0,1 °C, reakcijos laikas 0,1 s, spinduliavimo diapazonas 0,1–1,0 (vario 0,7–0,8).

1 lentelė. Sandūrinio suvirinimo mašinos MKCCO techninės charakteristikos (Chaika et al., 2015)

Charakteristika	Duomenys
Laidininko skersmuo (Cu), mm	iki 9
Naudojama įtampa (AC dažnis 50 Hz), V	380
Fazių kiekis, vnt.	2
Didžiausioji srovė pirminiame kontūre, A	55
Įtampa suvirinimo transformatoriaus antriniame kontūre, V	2,8–4,5
Didžiausioji galia, kW	20
Suvirinimo ciklo trukmė, s	iki 2,5
Susodinimo jėga, N	400–1500
Bazinis ilgis, mm	20



5 paveikslas. Cu-Nb 18 % mikrokompozitinio laido, virintinės jungties struktūra

Mikrokompozitinio laidininko ir pavyzdžio su virintine jungtimi (5, 7 pav.) savitoji varža buvo matuojama keturių taškų matavimo metodu. Matavimams buvo taikomas elektrinės varžos matuoklis – skaitmeninis mikrometras UNI-T UT602C (Kinija), kurio matavimo tikslumas yra $\pm 0,1$ % (UNI-T, 2017). Matavimai vykdyti pagal ASTM B19320 reikalavimus. Bandinių matmenys (2 lentelė) matuoti elektroniniu slankmačiu PD-151 (Kinija), kurio matavimo paklaida yra 0,01 mm. Aplinkos temperatūra, atliekant matavimus, buvo 20 °C, todėl korekcijos skaičiavimai, numatyti standarte ASTM B193, nėra taikomi. Mikrokompozitinio laidininko paviršiai kontakto su varžos prietaiso gnybtais vietoje buvo specialiai paruošti: šlifuojant pašalintas oksidinės plėvelės sluoksnis, po to paviršiai apdoroti ultragarsinėje vonelėje ir pabaigoje riebalai pašalinami spiritu.

2 lentelė. Laidininko bandinio matmenys

Parametras	Išmatuotas dydis	
	Bandinys Nr. 1 (nesuvirintas)	Bandinys Nr. 2 (suvirintas)
Ilgis (l_1)	45,00 mm	45,00 mm
Aukštis (a)	2,36 mm	2,36 mm
Plotis (b)	4,20 mm	4,20 mm
Skerspjūvio plotas (A)	9,912 mm ²	9,912 mm ²
Atstumas tarp matavimo gnybtų (l_2)	32,59 mm	32,59 mm

Mikrokompozitinių laidininkų ir jų jungčių elektrinio laidumo matavimui (5 lentelė, 8 ir 9 pav.) sukurinių sroviių metodu buvo taikomas defektoskopas *SigmaScope* SM350 (6 pav.). Matavimo paklaida $\pm 0,5$ % nuo išmatuotos vertės. Matavimai atlikti pagal standarto ASTM E1004 reikalavimus. Elektrinio laidumo matavimai buvo vykdomi esant aplinkos temperatūrai 20 °C. Matavimai buvo atlikti išilginiame ir skersiniame bandinių skerspjūviuose (mikrošlifų paviršiuje). Mikrošlifai buvo šlifuojami ir poruojami taikant *Buehler Beta* poliravimo stakles su skirtingo grūdėtumo abrazyviniu popieriumi ir 1 μ m poliravimo pasta. Po to paviršiai apdoroti ultragarsinėje vonelėje ir pabaigoje riebalai pašalinami spiritu.



a) b)

6 paveikslas. Cu-Nb 18 % mikrokompozitinio laidininko pavyzdžių elektrinio laidumo matavimo stendas: a – matavimo prietaiso *SigmaScope* 350 bendras vaizdas; b – aplinkos temperatūros matavimo įranga



a) b)

7 paveikslas. Cu-Nb 18 % mikrokompozitinio laidininko savitosios varžos matavimo stendas: a – laido tvirtinimo bazė; b – įrenginys UNI-T UT602C

6. Tyrimo rezultatai

Cu-Nb 18 % mikrokompozitinio laidininko teorinis elektrinis laidumas apskaičiuotas pagal (6) formulę:

$$\sigma_{Cu-Nb\ 18\ \%} = (0,18 \cdot 6,7 \cdot 10^6) + (0,82 \cdot 5,96 \cdot 10^7) = 5 \cdot 10^7 \text{ (S} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}. \quad (8)$$

Cu-Nb 18 % mikrokompozitinio laidininko elektrinis laidumas IACS vienetais yra apskaičiuojamas gautą savitojo elektrinio laidumo reikšmę santykinai palyginant su etalnine IACS reikšme, kuri yra $5,8001 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$.

$$\sigma_{Cu-Nb\ 18\ \%} = \frac{5 \cdot 10^7}{5,8001 \cdot 10^7} \cdot 100\ \% = 86\ \% \text{ IACS}. \quad (9)$$

Savitosios varžos ir elektrinio laidumo matavimai buvo atlikti su mikrokompozitiniu Cu-Nb 18 % laidininku ir jo sandūrine virintine jungtimi. Visi tirti bandiniai buvo 45,0 mm ilgio. Bandinio skerspjūvio plotas (S) apskaičiuotas atsižvelgiant į laidininko skerspjūvio matavimo rezultatus:

$$S = a \cdot b = 2,36 \cdot 4,2 = 9,912 \text{ mm}^2. \quad (10)$$

Cu-Nb 18 % laidininko fragmento (kai atstumas tarp gnybtų buvo lygus 32,59 mm) išmatuota varža R lygi:

$$R = 8,7 \cdot 10^{-5} \ \Omega.$$

Tuomet laidininko savitoji elektrinė varža pagal (7) formulę yra lygi:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} = \frac{9,912 \cdot 10^{-6} \cdot 8,7 \cdot 10^{-5}}{32,59 \cdot 10^{-3}} = 2,646 \cdot 10^{-8} \ \Omega \cdot \text{m}. \quad (11)$$

Kompozitinio laidininko elektrinis laidumas pagal (1) formulę yra lygus:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{2,646 \cdot 10^{-8}} = 3,779 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}. \quad (12)$$

Cu-Nb 18 % laidininko elektrinio laidumo reikšmė IACS vienetais yra lygi:

$$\sigma_{Cu-Nb 18\%} = \frac{\sigma_{Cu}}{\sigma_{Cu-Nb 18\%}} = \frac{3,779 \cdot 10^7}{5,8001 \cdot 10^7} \cdot 100\% = 65,10\% \text{ IACS}. \quad (13)$$

Cu-Nb 18 % laidininko su virintine jungtimi fragmento (kai atstumas tarp gnybtų buvo lygus 32,59 mm) išmatuota varža R lygi:

$$R = 9,05 \cdot 10^{-5} \Omega.$$

Tuomet laidininko su virintine jungtimi savitoji elektrinė varža pagal (7) formulę yra lygi:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} = \frac{9,912 \cdot 10^{-6} \cdot 9,05 \cdot 10^{-5}}{32,59 \cdot 10^{-3}} = 2,752 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}. \quad (14)$$

Kompozitinio laidininko su virintine jungtimi elektrinis laidumas pagal (1) formulę yra lygus:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{2,752 \cdot 10^{-8}} = 3,633 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}. \quad (15)$$

Cu-Nb 18 % laidininko elektrinio laidumo reikšmė IACS vienetais yra lygi:

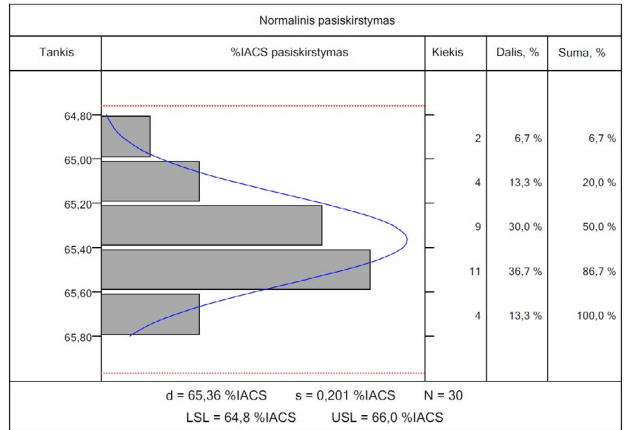
$$\sigma_{Cu-Nb 18\%} = \frac{\sigma_{Cu}}{\sigma_{Cu-Nb 18\%}} = \frac{3,633 \cdot 10^7}{5,8001 \cdot 10^7} \cdot 100\% = 62,63\% \text{ IACS}. \quad (16)$$

3 lentelė. Mikrokompozito sudedamųjų elektrinis laidumas 20 °C temperatūroje (Mehvari et al., 2022; Technical data for Niobium, 2023)

Gryno vario elektrinis laidumas, S · m ⁻¹	Gryno vario savitoji elektrinė varža, Ω · m	Gryno niobio elektrinis laidumas, S · m ⁻¹	Gryno niobio savitoji elektrinė varža, Ω · m
5,96 · 10 ⁷	1,68 · 10 ⁻⁸	6,7 · 10 ⁶	1,49 · 10 ⁻⁷

4 lentelė. Cu-Nb 18 % mikrokompozitinio laidininko matavimų, atliktų su Sigmascope SM350, rezultatai

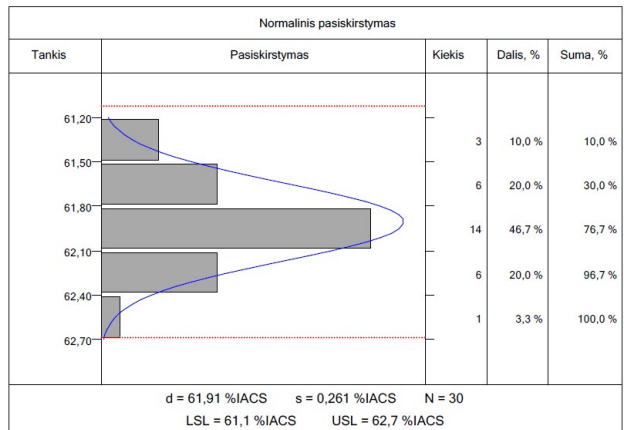
Parametras	Išmatuotas dydis (S · m ⁻¹) skalėje	Išmatuotas dydis (IACS) skalėje
Matavimų sk.	30 vnt.	30 vnt.
Vidurkis	3,745 · 10 ⁷ (S · m ⁻¹)	65,36 % (IACS)
Standartinis nuokrypis	0,143 · 10 ⁶ (S · m ⁻¹)	0,7 % (IACS)
Pokyčio koef.	0,4 %	0,3 %
Mažiausioji vertė	3,72 · 10 ⁷ (S · m ⁻¹)	64,97 % (IACS)
Didžiausioji vertė	3,78 · 10 ⁷ (S · m ⁻¹)	65,67 % (IACS)



8 paveikslas. Cu-Nb 18 % mikrokompozitinio laidininko elektrinio laidumo normalinio pasiskirstymo kreivė

5 lentelė. Suvirinto bandinio matavimų, atliktų su Sigmascope SM350, rezultatai

Parametras	Išmatuotas dydis (S · m ⁻¹) skalėje	Išmatuotas dydis (IACS) skalėje
Matavimų sk.	30 vnt.	30 vnt.
Vidurkis	3,592 · 10 ⁷ (S · m ⁻¹)	61,91 % (IACS)
Standartinis nuokrypis	0,727 · 10 ⁶ (S · m ⁻¹)	0,26 % (IACS)
Pokyčio koef.	2,0 %	0,4 %
Mažiausioji vertė	3,48 · 10 ⁷ (S · m ⁻¹)	61,45 % (IACS)
Didžiausioji vertė	3,70 · 10 ⁷ (S · m ⁻¹)	62,69 % (IACS)



9 paveikslas. Cu-Nb 18 % mikrokompozitinio laidininko, virintinės jungties, elektrinio laidumo normalinio pasiskirstymo kreivė

Teoriškai apskaičiuotas Cu-Nb 18 % laidininko elektrinis laidumas ~ 86 % IACS yra daug geresnis nei faktiškai pasiekiamas. Palyginus bandinių elektrinio laidumo matavimų duomenis (6 lentelė), kurie yra pateikti 3 ir 4 lentelėse, matoma, kad Cu-Nb 18 % laidininko ir jo fragmento su virintine jungtimi elektrinio laidumo faktinės reikšmės yra artimos ir koreliuoja su įvairiuose literatūros šaltiniuose pateiktais duomenimis. Pagal literatūros šaltinio (Bartkevičius & Novickij, 2009) ir gamintojo informaciją (Pantsyrny et al.,

2008) tokio laidininko faktinis elektrinis laidumas būna apie 63–65 % IACS, o pavyzdžių su virintinėmis jungtimis (Mikalauskas, 2020) elektrinis laidumas ir savitoji varža skiriasi nuo laidininko parametrų iki 1,2 karto.

6 lentelė. Gautų rezultatų palyginimas

Elektrinis laidumas	Matavimai 4 taškų metodu panaudojant mikrometrą	Matavimai sūkurinių srovių metodu	Matavimo rezultatų skirtumas, %
σ (IACS) nesuvirinto	65,10 %	64,0 %	1,68 %
σ ($S \cdot m^{-1}$) nesuvirinto	$3,779 \cdot 10^7$	$3,704 \cdot 10^7$	2,02 %
σ (IACS) suvirinto	62,63%	61,91 %	1,14 %
σ ($S \cdot m^{-1}$) suvirinto	$3,633 \cdot 10^7$	$3,592 \cdot 10^7$	1,12 %

7. Išvados

- Atliktų mokslinių publikacijų analizė ir tyrimo rezultatai įrodė, kad taikomos praktikoje kompozitinių medžiagų savybių apskaičiavimo metodikos neleidžia tiksliai prognozuoti mikrokompozitinių laidininkų ir jų jungčių savitąjį elektrinį laidumą ir savitąją elektrinę varžą, nes neįvertina visų šias savybes veikiančių parametrų.
- Savitosios elektrinės varžos ir elektrinio laidumo matavimo skirtingais metodais nustatyta, kad gaunamos išmatuotų dydžių reikšmės yra artimos. Skirtumas neviršija 2 %. Toks matavimų rezultatų skirtumas gaunamas dėl taikomų metodikų skirtumų. Sūkurinių srovių metodas yra paviršinis, o savitosios elektrinės varžos matavimai 4 taškų metodu yra atliekami tam tikrame medžiagos tūryje. Dėl šios specifikos 4 taškų metodas lengviau pritaikomas ne tik mikrokompozitinio laidininko, bet ir jo virintinių jungčių savybių nustatymui. Nustatyta, kad Cu-18 Nb % mikrokompozitinio laidininko kontaktinio sandūrinio suvirinimo jungčių savitasis elektrinis laidumas vidutiniškai sumažėjo iki 2,5 %.

Literatūra

- Adesakin, G. E. (2016). Effect of linear deformation on electrical conductivity of metal. *Advances in Physics Theories and Applications*, 53, 10–17.
- ASTM International. (2020). *Standard test method for resistivity of electrical conductor materials* (ASTM B193-20). <https://www.astm.org/b0193-20.html>
- ASTM International. (1999). *Standard practice for determining electrical conductivity using the electromagnetic (eddy-current) method*. <https://www.astm.org/e1004-99.html>
- Awan, T. I., Bashir, A., & Tehseen, A. (2020). *Chemistry of nanomaterials: Fundamentals and applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04648-4>
- Bartkevičius, S., & Novickij, J. (2009). The investigation of magnetic field distribution of dual coil pulsed magnet. *Electronics and Electrical Engineering*, 4(92), 23–26. <https://www.eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/10219/5096>
- Bass, J. (2022). Conductivity, electrical. *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, 3, 251–259. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90800-9.00065-2>
- Blaschke, D. N., Miller, C., Mier, R., Osborn, C., Thomas, S. M., Tegtmeyer, E. L., Winter, W. P., Carpenter, J. S., & Hunter, A. (2022). Predicting electrical conductivity in Cu/Nb composites: A combined model-experiment study. *Journal of Applied Physics*, 132(4), 045105. <https://doi.org/10.1063/5.0096880>
- Bowler, N., & Huang, Y. (2005). Electrical conductivity measurement of metal plates using broadband eddy-current and four-point methods. *Measurement Science and Technology*, 16(11), 2193–2200. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/11/009>
- Çetinarslan, C. S. (2009). Effect of cold plastic deformation on electrical conductivity of various materials. *Materials and Design*, 30(3), 671–673. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.05.035>
- Chaika, V. G., Krushnevis, S. P., Volohatyuk, B. I., & Chatajan, A. A. (2015). Machines for resistivity butt welding of bandsaws, bars, wires and rods. *Automatic Welding*, 12, 60–63.
- Chu, J., Liu, X., Zhang, X., Zhang, J., Xiao, J., Chen, X., & Xu, J. (2023). Annealing temperature dependence of mechanical and structural properties of chromium-gold films on the silica glass substrate. *Thin Solid Films*, 774, 139849. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.139849>
- Fickett, F. R. (1982). *Electrical properties of materials and their measurement at low temperatures* (NBS technical note 1053, pp. 43–44). U.S. Department of commerce / National Bureau of Standards. <https://doi.org/10.6028/NBS.TN.1053>
- Filgueira, M., Holanda, J., Rosenthal, R., & Pinatti, G. (2001). Mechanical behaviour of copper 15% volume niobium microcomposite wires. *Materials Research*, 4(2), 127–131. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392001000200015>
- Yamada, T., Abe, E., Osawa, C., & Yukawa, N. (2018). Prediction on microstructure and mechanical properties of hot forged Ni-based super alloy by optimization using genetic algorithms. *Procedia Manufacturing*, 15, 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.230>
- Kozlenkova, N., Pantsyrnyi, V., Nikulin, A., Shikov, A., & Potapenko, I. (1996). Electrical conductivity of high-strength Cu-Nb microcomposites. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32(4), 2921–2924. <https://doi.org/10.1109/20.511487>
- Lemos, G., Fredel, M. C., Pyczak, F., & Tetzlaff, U. (2022). Creep resistance improvement of a polycrystalline Ni-based superalloy via TiC particles reinforcement. *Materials Science and Engineering: A*, 854, 143821. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143821>
- Li, J. C., Wang, Y., & Ba, D. C. (2012). Characterization of semiconductor surface conductivity by using microscopic four-point probe technique. *Physics Procedia*, 32, 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.568>
- Mehvari, S., Sanchez-Vicente, Y., González, S., & Lafdi, K. (2022). Conductivity behaviour under pressure of copper micro-additive/polyurethane composites (experiment and modelling). *Polymers*, 14(7), 1287. <https://doi.org/10.3390/polym14071287>
- Mikalauskas, G., Višniakov, N., Lukauskaitė, R. ir Škamat, J. (2016). Mikrokompozitinių Cu-Nb laidininkų ypatumų ir jų jungimo analizė. *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 8(6), 609–614. <https://doi.org/10.3846/mla.2016.980>
- Mikalauskas, G. (2020). *Investigation of welded joints and weldability of microcomposite copper-niobium conductors for the application in high magnetic field systems* [Doctoral dissertation, Vilnius Gediminas Technical University]. VGTU Repository. <http://dspace.vgtu.lt/handle/1/3838>
- Uvarov, N. F. (2000). Estimation of composites conductivity using a general mixing rule. *Solid State Ionics*, 136–137, 1267–1272. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(00\)00585-3](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00585-3)

- Pantsyrny, V., Shikov, A. K., Vorobieva, V. E., Khlebova, N., Kozlenkova, N. I., Drobishev, V. A., Potapenko, I. I., Beliakov, N. A., & Polikarpova, M. V. (2008). High strength, high conductivity microcomposite Cu-Nb wires with cross sections in the range of 0.01–100 mm². *IEEE Transactions Applied Superconductivity*, 18(2), 616–619. <https://doi.org/10.1109/TASC.2008.921241>
- Ramadan, A. A., Gould, R. D., & Ashour, A. (1994). On the Van der Pauw method of resistivity measurements. *Thin Solid Films*, 239(2), 272–275. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(94\)90863-X](https://doi.org/10.1016/0040-6090(94)90863-X)
- Rizzo, P. (2014). Sensing solutions for assessing and monitoring railroad tracks. In *Sensor technologies for civil infrastructures* (Vol. 56, pp. 497–524). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781782422433.2.497>
- Sigmascope SMP350: Operator's manual*. (2017). https://helmut-fischer.gr/files/items/55/BROC_SIGMASCOPE-SMP350_973-034_us.pdf
- Stricker, S. (1968). The hall effect and its applications. *Advances in Electronics and Electron Physics*, 25, 97–143. [https://doi.org/10.1016/S0065-2539\(08\)60509-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2539(08)60509-0)
- Sundqvist, B. (2022). Resistivity saturation in crystalline metals: Semi-classical theory versus experiment. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 165, 110686. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110686>
- Technical data for Niobium*. (2023). <https://periodictable.com/Elements/041/data.html>
- United States Department of Commerce. (1914). *International Annealed Copper Standard*.
- UNI-T. (2017). *Technical specification. UT620C operating manual*. <https://meters.uni-trend.com/product/ut620a/>
- Valdes, L. B. (1954). Resistivity measurements on germanium for transistors. *Proceedings of IRE* (pp. 420–427). IEEE. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1954.274680>
- 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>
- Zhuyikov, S. (2018). *Nanostructured semiconductor oxides for the next generation of electronics and functional devices*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781782422242.1>
- Zhao, L., Wang, Q., Shi, G., Yang, X., Qiao, M., Wu, J., & Zhang, Z. (2022). In-depth understanding of the relationship between dislocation substructure and tensile properties in a low-carbon microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*, 854, 143681. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143681>

MEASUREMENT OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND RESISTIVITY OF CU-NB18% MICROCOMPOSITE CONDUCTOR AND ITS WELDED JOINT

P. Beinoras, N. Višniakov

Abstract

Systems generating strong magnetic fields are widely used in modern fundamental and applied research as well as in the most innovative industrial processes. These devices generate magnetic fields that reach 5–100 T and the conductors are subjected to a huge Lorentz force, so the conductor material must be extremely strong (UTS ≥ 700 MPa) and have a good specific electrical conductivity (IACS ≥ 60%). Since traditional conductors such as copper, aluminum, gold, and silver cannot withstand such loads, microcomposite materials have been developed that are characterized by such high strength and good specific electrical conductivity. This paper reviews the specific electrical conductivity and specific electrical resistance characteristics of conductor and factors affecting them, methods of measuring these electrical characteristics as well as properties of Cu-Nb18% microcomposite conductor. This paper also describes the methodology for measuring the specific electrical conductivity and specific electrical resistance of the Cu-Nb18% microcomposite conductor solid and with welded joint (welded by using butt welding). The comparison of application possibilities of used methodologies and obtained characteristics was carried out.

Keywords: electrical conductivity, specific electrical resistance, Cu-Nb microcomposite conductors, welded joints, measurements.