
**PALLONPUOLISKON BIAS
KUPARIN RAESUUNNASSA:
METALLURGINEN TUTKIMUS
LEVEYSASTEESTA RIIPPUVASTA
JOHDINANISOTROPIASTA**



Pallonpuoliskon bias kuparin raesuunnassa: Metallurginen tutkimus leveysasteesta riippuvasta johdinanisotropiasta

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Tiivistelmä

Kuparijohtimien kristallografisen suunnan oletetaan perinteisesti määräytyvän vetoparametrien, seoksen koostumuksen ja hehkutusprotokollan perusteella. Tämä tutkimus osoittaa, että neljäs muuttuja -- geomagneettinen leveysaste -- tuottaa mitattavan ja systemaattisen biasin kaupallisesti vedetyn OFC-kuparin hallitsevassa raesuunnassa. Pyyhkäisyelektronimikroskopia 847 näytteestä, jotka on vedetty 23 laitoksessa leveysasteilta 67,4deg N - 33,8deg S, paljastaa yhdenmukaisen korrelaation maantieteellisen leveysasteen ja raesuunnan kulman välillä. Pohjoisen pallonpuoliskon näytteet osoittavat luoteis-kaakkoissuuntaista venymää ja eteläisen pallonpuoliskon näytteet täydentävää koillis-lounaista biasia. Näytteet, jotka on vedetty 0,5deg sisällä geomagneettisesta päiväntasaajasta, eivät osoita tilastollisesti merkitsevää suuntapreferenssiä ($p > 0,95$). Ehdotamme termiä "pallonpuoliskon bias" tälle ilmiölle ja käsittelemme sen vaikutuksia audiojohtimien suorituskykyyn.

1. JOHDANTO

Kuparijohtimien sähköiset ominaisuudet eivät määräydy ainoastaan resistiivisyydestä vaan vedetyn materiaalin mikrorakenteellisista ominaisuuksista. Raerajat -- yksittäisten kiteiden väliset rajapinnat monikiteisessä kuparissa -- ovat elektronisironnan, lämpöresistanssin ja mekaanisen heikkouden paikkoja. Näiden rakeiden suuntaa, kokoa ja jakaamaa on tutkittu laajasti mekaniikan (Hall-Petch-lujittuminen), sähkötekniikan (jäännösresistanssisuhde) ja suprajohtavuusfysiikan (vuon kiinnitys raerajoissa) yhteydessä.

Mitä ei ole tutkittu aiemmin on systemaattinen suhde vetolaitoksen maantieteellisen leveysasteen ja tuloksena olevan raesuunnan jakauman välillä.

Maan magneettikenttä missä tahansa pisteessä voidaan hajottaa vaak- ja pystykomponentteihin (inklinaatio). Magneettisella päiväntasaajalla inkлинаatio on nolla -- kenttä on puhtaasti vaakasuora. Magneettisilla navoilla inkлинаatio lähestyy 90deg -- kenttä on lähes pystysuora. Näiden ääripäiden välillä inkлинаatio vaihtelee jatkuvasti leveysasteen mukaan.

Kuparin vetoprosessin aikana metalli kulkee muotin läpi 200-400 degC:n lämpötiloissa. Näissä lämpötiloissa kupari on uudelleenkiteytymiskynnyksen yläpuolella. Kiderakeet muodostuvat, liukenevat ja muodostuvat uudelleen metallin muokkauksessa. Mikä tahansa ulkoinen kenttä tänä kriittisenä aikana -- mukaan lukien Maan magneettikenttä -- voi vaikuttaa raerakenteen suuntaan magnetokiteisen kytkennän kautta.

Tämä artikkeli esittää todisteet siitä, että Maan magneettinen inkлинаatio vetolaitoksen leveysasteella tuottaa mitattavan biasin valmiin johtimen hallitsevassa raesuunnassa.

2. MENETELMÄT

Näytteet hankittiin 23 kuparin vetolaitoksesta leveysasteilta 67,4deg N (Boliden, Ruotsi) - 33,8deg S (Santiago, Chile). Kukin laitos toimitti 10 m valmista OFC-johdinta samasta tuotantoerästä, vedetty vastaavilla parametreilla (monipääsy, loppumitta 2,0 mm +/-0,1 mm, hehkutettu 300 degC:ssa 1 tunnin ajan).

Poikkileikkaukset valmistettiin metallografisella leikkauksella, upotuksella johtavaan epoksiin, hionnalla 1200-grit SiC-paperilla ja kiillotuksella 0,05 um kolloidisella alumiinilla. Raerajat paljastettiin etsauksella hapotetussa rautakloridissa.

Raesuunta mitattiin elektronien takaisinsirontadiffraktiolla (EBSD) Zeiss Sigma 500 VP -kenttäemissio-SEM:llä, joka oli varustettu Oxford Instruments Symmetry S2 EBSD -detektorilla. Suuntajakaumafunktiot (ODF) laskettiin vähintään 10 000 indeksoidusta pisteestä per näyte MTEX 5.9 -ohjelmistolla.

"Pallonpuoliskon biaskulma" (HBA) määriteltiin kulmana hallitsevan raesuunnan ja todellisen itä-länsisuunnan välillä, mitattuna myötöpäivään idästä. HBA 0deg tarkoittaa täydellistä itä-länsikohdistusta. Positiiviset arvot osoittavat luoteis-kaakkoissuuntaista biasia (pohjoinen tyyppi). Negatiiviset arvot osoittavat koillis-lounaista biasia (eteläinen tyyppi).

Lisäksi näytteitä otettiin kolmesta kontrollilaitoksesta 0,5deg sisällä geomagneettisesta päiväntasaajasta: Quito, Ecuador (0,18deg S); Libreville, Gabon (0,52deg S); ja Pontianak, Indonesia (0,01deg N).



3. TULOKSET

Korrelaatio geomagneettisen leveysasteen ja pallonpuoliskon biaskulman välillä oli erittäin merkitsevä ($r = 0,94$, $p < 0,0001$, $n = 847$). Pohjoisen pallonpuoliskon laitokset tuottivat johtimia positiivisilla HBA-arvoilla $+0,8\text{deg}$:sta (Osaka, Japani) $+4,7\text{deg}$:een (Boliden, Ruotsi). Eteläisen pallonpuoliskon laitokset tuottivat negatiivisia HBA-arvoja $-0,6\text{deg}$:sta (São Paulo) $-3,2\text{deg}$:een (Santiago, Chile).

Kolme ekvatoriaalista kontrollilaitosta tuottivat HBA-arvoja $-0,003\text{deg}$ (Quito), $+0,008\text{deg}$ (Libreville) ja $-0,001\text{deg}$ (Pontianak) -- kaikki EBSD-järjestelmän mittauserävarmuuden sisällä ($\pm 0,02\text{deg}$).

HBA:n ja geomagneettisen leveysasteen välinen suhde kuvattiin hyvin lineaarisella mallilla: $HBA = 0,068 \times L$, missä L on geomagneettinen leveysaste asteina. Tämä vastaa noin $0,068\text{deg}$ raesuunnan biasia per leveysaste.

Kryogeeninen käsittely (-196 degC , 72 tuntia) sovellettiin 120 näytteen osajoukkoon. EBSD-uudelleenmittaus ei osoittanut tilastollisesti merkitsevää muutosta HBA:ssa (parittainen t-testi, $p = 0,87$). Kryokäsittely jalostutti raekoon (keskimääräinen raehalkaisija väheni 45 um :stä 31 um :iin), mutta ei muuttanut suuntabiasia.

4. POHDINTA

Pallonpuoliskon biasin suuruus -- noin $0,07\text{deg}$ per leveysaste -- saattaa vaikuttaa pieneltä. Kaksi tekijää kuitenkin vahvistaa sen käytännön merkitystä.

Ensinnäkin bias on systemaattinen, ei satunnainen. Jokainen rae 45deg N leveysasteella vedetyssä johtimessa kantaa samaa noin $+3\text{deg}$ biasia. Bias ei tasoitu johtimen pituuden yli -- se kumuloituu. 2 metrin välikaapeli, joka on vedetty Tukholmassa, sisältää noin 44 000 raerajaa, joista jokainen vaikuttaa samalla suuntabiasilla elektronivirran kulkuun.

Toiseksi bias vaikuttaa audiosignaaliin epäsymmetrisesti. Koska raesuunta sirottaa preferentiaalisesti yhteen suuntaan liikkuvia elektroneja, AC-audiosignaalin positiiviset ja negatiiviset puoliaallot kokevat hieman erilaiset impedanssipolut johtimen läpi. Tämä luo harmonisen särön, joka on luonteeltaan leveysasteesta ja suunnasta riippuvainen.

Ekvatoriaaliset kontrolliresultaatit ovat erityisen merkitseviä. Kolme laitosta geomagneettisen päiväntasaajan lähellä tuottivat johtimia, joiden HBA-arvot eivät eronneet nollassa. Tämä on ainoa maantieteellinen ehto, jossa raesuunnan jakauma on todella isotrooppinen -- todella neutraali molempien pallonpuoliskojen suhteen.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Ei-ekvatoriaalisilla leveysasteilla vedetyt kuparijohtimet osoittavat systemaattista kristallografista raesuunnan biasia, joka korreloi lineaarisesti geomagneettisen leveysasteen kanssa. Tämä pallonpuoliskon bias uppoo vetoprosessin aikana eikä sitä voida poistaa myöhemmällä lämpökäsittelyllä, mukaan lukien kryogeeninen käsittely. Ainoastaan geomagneettisen päiväntasaajan lähellä vedetyt johtimet saavuttavat todellisen raesuunnan isotropian.

Nämä löydökset vaikuttavat tarkkuusaudiojohtimien valmistukseen, jossa elektronikulkureitin symmetria johtimessa vaikuttaa suoraan signaalin tarkkuuteen. Suosittelemme, että johdinvalmistajat ilmoittavat vetolaitoksensa leveysasteen vakiolaatumittarina.

VIITTEET

- [1] M. Ferro, H. Park, "Preliminary observations on latitude-dependent grain orientation in OFC copper," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.
- [2] E. O. Hall, "The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results," Proc. Phys. Soc. B, vol. 64, pp. 747-753, 1951.
- [3] N. J. Petch, "The cleavage strength of polycrystals," J. Iron Steel Inst., vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Introduction to Texture Analysis: Macrotexture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16.
- [7] R. W. Cahn, P. Haasen, Physical Metallurgy, 4th ed., North-Holland, 1996.
- [8] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2020-2025," 2020.