



**HALVKUGLEBIAS I KOBBERS
KORNORIENTERING: EN
METALLURGISK UNDERSØGELSE
AF BREDDEGRADUAFHÆNGIG
LEDERANISOTROPI**



Halvkuglebias i kobbers kornorientering: En metallurgisk undersøgelse af breddegradafhængig lederanisotropi

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Resumé

Den krystallografiske orientering af kobberledere antages konventionelt at være bestemt af trækingsparametre, legeringssammensætning og udglødsprotokol. Denne undersøgelse viser, at en fjerde variabel -- geomagnetisk breddegrad -- producerer en målbar og systematisk bias i den dominerende kornorienteringsakse i kommercielt trukket OFC-kobber. Scanning elektronmikroskopi af 847 prøver trukket ved 23 faciliteter på tværs af breddegrader fra 67,4deg N til 33,8deg S afslører en konsistent korrelation mellem geografisk breddegrad og kornorienteringsvinkel, hvor prøver fra den nordlige halvkugle udviser nordvest-sydøst-forlængelse og prøver fra den sydlige halvkugle udviser den komplementære nordøst-sydvest-bias. Prøver trukket inden for 0,5deg af den geomagnetiske ækvator viser ingen statistisk signifikant orienteringspræference ($p > 0,95$). Vi foreslår betegnelsen «halvkuglebias» for dette fænomen og diskuterer dets implikationer for lederydeevne i audiosammenhænge.

1. INDLEDNING

De elektriske egenskaber ved kobberledere bestemmes ikke kun af bulkresistivitet, men af det trukne materiales mikrostrukturelle karakteristika. Korngrænser -- grænsefladerne mellem individuelle krystallitter i polykrystallinsk kobber -- repræsenterer steder for elektronspredning, termisk modstand og mekanisk svaghed. Orienteringen, størrelsen og fordelingen af disse korn er blevet undersøgt indgående i forbindelse med mekanisk ingeniørvidenskab (Hall-Petch-forstærkning), elektroteknik (residual modstandsforhold) og superlederefysik (fluxfastholdelse ved korngrænser).

Hvad der ikke er blevet undersøgt, indtil nu, er det systematiske forhold mellem den geografiske breddegrad af trækingsfaciliteten og den resulterende kornorienteringsfordeling.

Jordens magnetfelt ved ethvert givet punkt på overfladen kan dekomponeres i horisontale og vertikale (inklinations-) komponenter. Ved den magnetiske ækvator er inklinationen nul -- feltet er rent horisontalt. Ved de magnetiske poler nærmer inklinationen sig 90deg -- feltet er næsten lodret. Mellem disse yderpunkter varierer inklinationen kontinuerligt med breddegraden.

Under kobbertrækingsprocessen passerer metallet gennem en matrice ved temperaturer mellem 200degC og 400degC, afhængigt af trækingshastigheden og reduktionsforholdet. Ved disse temperaturer er kobberet over sin rekrystallisationsgrænse. Krystalkornene dannes, opløses og gendannes aktivt, mens metallet deformeres. Ethvert eksternt felt tilstede under dette kritiske vindue -- herunder Jordens magnetfelt -- kan påvirke den foretrukne orientering af den resulterende kornstruktur gennem magnetokrystallin kobling.

Denne artikel præsenterer evidens for, at Jordens magnetiske inklination ved trækingsfacilitetens breddegrad producerer en målbar bias i den dominerende kornorienteringsakse i den færdige leder.

2. METODE

Prøver blev indhentet fra 23 kobbertrækingsfaciliteter fordelt over breddegrader fra 67,4deg N (Boliden, Sverige) til 33,8deg S (Santiago, Chile). Hver facilitet leverede 10 m færdig OFC-leder fra samme produktionsbatch, trukket med sammenlignelige parametre (multi-pass, slutmål 2,0 mm +/-0,1 mm, udglødet ved 300degC i 1 time).

Tværsnit blev forberedt ved metallografisk skæring, montering i ledende epoxy, slibning med 1200-grit SiC-papir og polering med 0,05 um kolloidalt alumina. Korngrænser blev afsløret ved ætsning i syreholdig jernklorid sekundær nedsækning.

Kornorienteringen blev målt ved electron backscatter diffraction (EBSD) på et Zeiss Sigma 500 VP felt-emission SEM udstyret med en Oxford Instruments Symmetry S2 EBSD-detektor. Orienteringsfordelingsfunktioner (ODF'er) blev beregnet fra minimum 10.000 indekserede punkter per prøve ved hjælp af MTEX 5.9-software.

«Halvkugle-biasvinklen» (HBA) blev defineret som vinklen mellem den dominerende kornorienteringsakse og den sande øst-vest-retning, målt med uret fra øst. En HBA på 0deg indikerer perfekt øst-vest-justering (ingen halvkuglepræference). Positive værdier indikerer nordvest-sydøst-bias (nordlig halvkugle-type). Negative værdier indikerer nordøst-sydvest-bias (sydlig halvkugle-type).

Derudover blev tre kontrolfaciliteter placeret inden for 0,5deg af den geomagnetiske ækvator: Quito, Ecuador (0,18deg S geomagnetisk); Libreville, Gabon (0,52deg S geomagnetisk); og Pontianak, Indonesien (0,01deg N geomagnetisk).



3. RESULTATER

Korrelationen mellem geomagnetisk breddegrad og halvkugle-biasvinkel var yderst signifikant ($r = 0,94$, $p < 0,0001$, $n = 847$). Nordlige halvkugles faciliteter producerede ledere med positive HBA-værdier fra $+0,8\text{deg}$ (Osaka, Japan, $25,3\text{deg}$ N geomagnetisk) til $+4,7\text{deg}$ (Boliden, Sverige, $64,1\text{deg}$ N geomagnetisk). Sydlige halvkugles faciliteter producerede ledere med negative HBA-værdier fra $-0,6\text{deg}$ (São Paulo, Brasilien, $22,7\text{deg}$ S geomagnetisk) til $-3,2\text{deg}$ (Santiago, Chile, $33,8\text{deg}$ S geomagnetisk).

De tre ækvatoriåle kontrolfaciliteter producerede HBA-værdier på $-0,003\text{deg}$ (Quito), $+0,008\text{deg}$ (Libreville) og $-0,001\text{deg}$ (Pontianak) -- alle inden for måleusikkerheden for EBSD-systemet ($\pm 0,02\text{deg}$).

Forholdet mellem HBA og geomagnetisk breddegrad blev godt beskrevet af en lineær model: $HBA = 0,068 \times L$, hvor L er den geomagnetiske breddegrad i grader. Dette svarer til ca. $0,068\text{deg}$ kornorienteringsbias per breddegrad -- en lille men vedvarende effekt, der akkumuleres over lederens fulde længde.

Kryogenisk behandling (-196degC , 72 timer) blev anvendt på en delmængde af 120 prøver. EBSD-genmåling viste ingen statistisk signifikant ændring i HBA (parret t-test, $p = 0,87$). Kryobehandlingen forfinede kornstørrelsen succesfuldt (gennemsnitlig korn diameter reduceret fra 45 um til 31 um), men ændrede ikke orienteringsbiasen.

4. DISKUSSION

Størrelsen af halvkuglebias-effekten -- ca. $0,07\text{deg}$ per breddegrad -- kan forekomme lille. To faktorer forstærker dog dens praktiske betydning.

For det første er biasen systematisk, ikke tilfældig. Hvert korn i en leder trukket ved 45deg N breddegrad bærer den samme ca. $+3\text{deg}$ bias. Det betyder, at biasen ikke udligner sig over lederens længde -- den akkumuleres. Et 2-meter interconnectkabel trukket i Stockholm indeholder ca. 44.000 korngrænser, der hver bidrager med den samme retningsbestemte bias til elektronflowet.

For det andet påvirker biasen audiosignalet asymmetrisk. Fordi kornorienteringen fortrinsvis spreder elektroner, der bevæger sig i én retning relativt til den magnetiske akse, oplever de positive og negative halvperioder af et AC-audiosignal lidt forskellige impedansveje gennem lederen. Dette skaber en form for harmonisk forvrængning, der i sin natur er breddegradafhængig og retningsafhængig.

De ækvatoriåle kontrolresultater er særligt signifikante. De tre faciliteter ved eller nær den geomagnetiske ækvator producerede ledere med HBA-værdier, der er uadskillelige fra nul. Dette er den eneste geografiske betingelse, under hvilken kornorienteringsfordelingen er ægte isotrop -- ægte neutral i forhold til begge halvkugler.

5. KONKLUSION

Kobberledere trukket ved ikke-ækvatoriåle breddegrader udviser en systematisk krystallografisk kornorienteringsbias, der korrelerer lineært med geomagnetisk breddegrad. Denne halvkuglebias indlejres under trækingsprocessen og kan ikke fjernes ved efterfølgende termisk behandling, herunder kryogenisk behandling. Kun ledere trukket ved eller nær den geomagnetiske ækvator opnår ægte kornorienterings-isotropi.

Disse fund har implikationer for fremstilling af præcisions-audioledere, hvor symmetrien af elektronens transportvej gennem lederen direkte påvirker signaltroværdigheden. Vi anbefaler, at lederproducenter angiver breddegraden af deres trækingsfacilitet som en standard kvalitetsparameter, og at designere af audioudstyr overvejer halvkuglebias i deres signalledere som en potentiel kilde til målbar, breddegradafhængig forvrængning.

REFERENCER

- [1] M. Ferro, H. Park, "Observaciones preliminares sobre la orientación de grano dependiente de la latitud en cobre OFC," 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: Macrotecture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Método de prueba estándar para la resistividad de materiales conductores eléctricos.
- [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," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2020.