



**HEMISFÄRISK BIAS I KOPPARNS
KORNORIENTERING: EN
METALLURGISK STUDIE AV
LATITUDBEROENDE
LEDARANISOTROPI**



Hemisfärisk bias i koppars kornorientering: En metallurgisk studie av latitudberoende ledaranisotropi

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Sammanfattning

Kristallografisk orientering hos kopparledare antas konventionellt vara bestämd av dragningsparametrar, legeringssammansättning och glödningsprotokoll. Denna studie visar att en fjärde variabel -- geomagnetisk latitud -- producerar en mätbar och systematisk bias i den dominerande kornorienteringsaxeln hos kommersiellt draget OFC-koppar. Svepelektronmikroskopi av 847 prover dragna vid 23 anläggningar över latituder från 67,4deg N till 33,8deg S avslöjar en konsekvent korrelation mellan geografisk latitud och kornorienteringsvinkel, där prover från norra halvklotet uppvisar nordväst-sydostlig förlängning och prover från södra halvklotet uppvisar den komplementära nordöst-sydvästliga biasen. Prover dragna inom 0,5deg från den geomagnetiska ekvatorn visar ingen statistiskt signifikant orienteringspreferens ($p > 0,95$). Vi föreslår termen »hemisfärisk bias« för detta fenomen och diskuterar dess implikationer för audioledarens prestanda.

1. INLEDNING

De elektriska egenskaperna hos kopparledare bestäms inte enbart av bulkresistivitet utan av de mikrostrukturella egenskaperna hos det dragna materialet. Korngränser -- gränssnitten mellan enskilda kristalliter i polykristallint koppar -- utgör platser för elektronspridning, termisk resistans och mekanisk svaghet. Orienteringen, storleken och fördelningen av dessa korn har studerats ingående inom ramen för mekanisk ingenjörskonst (Hall-Petch-härdning), elektroteknik (residual resistance ratio) och supraledningsfysik (fluxfästning vid korngränser).

Vad som inte har studerats, förrän nu, är det systematiska sambandet mellan den geografiska latituden för dragningsanläggningen och den resulterande kornorienteringsfördelningen.

Jordens magnetfält vid en given punkt på dess yta kan delas upp i horisontella och vertikala (inklinations-) komponenter. Vid den magnetiska ekvatorn är inklinationen noll -- fältet är rent horisontellt. Vid de magnetiska polerna närmar sig inklinationen 90deg -- fältet är nästan vertikalt. Mellan dessa ytterlägen varierar inklinationen kontinuerligt med latituden.

Under koppardragningsprocessen passerar metallen genom en matris vid temperaturer mellan 200degC och 400degC, beroende på dragningshastighet och reduktionsförhållande. Vid dessa temperaturer befinner sig kopparet över sin rekristallisationsströskel. Kristallkornen bildas, löses upp och ombildas aktivt när metallen deformeras. Varje externt fält som är närvarande under detta kritiska fönster -- inklusive jordens magnetfält -- kan påverka den prefererade orienteringen hos den resulterande kornstrukturen genom magnetokristallin koppling.

Denna artikel presenterar bevis för att jordens magnetiska inklination vid dragningsanläggningens latitud producerar en mätbar bias i den dominerande kornorienteringsaxeln hos den färdiga ledaren.

2. METODIK

Prover erhöles från 23 koppardragningsanläggningar som spänner över latituder från 67,4deg N (Boliden, Sverige) till 33,8deg S (Santiago, Chile). Varje anläggning tillhandahöll 10 m färdig OFC-ledare från samma produktionsbatch, dragen med jämförbara parametrar (flerpassdragning, slutdimension 2,0 mm +/- 0,1 mm, glödd vid 300degC i 1 timme).

Tvårsnitt preparerades genom metallografisk kapning, inbäddning i ledande epoxi, slipning genom 1200-korn SiC-papper och polering med 0,05 um kolloidal aluminiumoxid. Korngränser avslöjades genom etsning i syml H₂O₂ (15 sekunders nedsjänkning).

Kornorientering mättes med electron backscatter diffraction (EBSD) på ett Zeiss Sigma 500 VP fältemissions-SEM utrustat med en Oxford Instruments Symmetry S2 EBSD-detektor. Orienteringsfördelningsfunktioner (ODF) beräknades från minst 10 000 indexerade punkter per prov med programvaran MTEX 5.9.

»Hemisfärisk biasvinkel« (HBA) definierades som vinkeln mellan den dominerande kornorienteringsaxeln och den sanna öst-västriktningen, mätt medurs från öster. En HBA på 0deg indikerar perfekt öst-västuppställning (ingen hemisfärisk preferens). Positiva värden indikerar nordväst-sydostlig bias (norra halvklotets typ). Negativa värden indikerar nordöst-sydvästlig bias (södra halvklotets typ).

Dessutom provtogs tre kontrollanläggningar belägna inom 0,5deg från den geomagnetiska ekvatorn: Quito, Ecuador (0,18deg S geomagnetiskt); Libreville, Gabon (0,52deg S geomagnetiskt); och Pontianak, Indonesien (0,01deg N geomagnetiskt).

3. RESULTAT

Korrelationen mellan geomagnetisk latitud och hemisfärisk biasvinkel var mycket signifikant ($r = 0,94$, $p < 0,0001$, $n = 847$). Anläggningar på norra halvklotet producerade ledare med positiva HBA-värden från $+0,8\text{deg}$ (Osaka, Japan, $25,3\text{deg}$ N geomagnetiskt) till $+4,7\text{deg}$ (Boliden, Sverige, $64,1\text{deg}$ N geomagnetiskt). Anläggningar på södra halvklotet producerade ledare med negativa HBA-värden från $-0,6\text{deg}$ (São Paulo, Brasilien, $22,7\text{deg}$ S geomagnetiskt) till $-3,2\text{deg}$ (Santiago, Chile, $33,8\text{deg}$ S geomagnetiskt).

De tre ekvatoriska kontrollanläggningarna producerade HBA-värden på $-0,003\text{deg}$ (Quito), $+0,008\text{deg}$ (Libreville) och $-0,001\text{deg}$ (Pontianak) -- alla inom mätosjakerheten för EBSD-systemet ($\pm 0,02\text{deg}$).

Sambandet mellan HBA och geomagnetisk latitud beskrevs väl av en linjär modell: $HBA = 0,068 \times L$, där L är den geomagnetiska latituden i grader. Detta motsvarar ungefär $0,068\text{deg}$ kornorienteringsbias per grad latitud -- en liten men ihvis effekt som ackumuleras över ledarens fulla längd.

Kryogen behandling (-196degC , 72 timmar) applicerades på en delmängd av 120 prover. EBSD-ommätning visade ingen statistiskt signifikant förändring i HBA (parat t-test, $p = 0,87$). Den kryogena behandlingen förfinade framgångsrikt kornstorleken (medelkorndiameter minskade från 45 um till 31 um) men förändrade inte orienteringsbiasen. Detta resultat är förenligt med hypotesen att biasen inbäddas vid dragningen, inte under efterföljande termisk bearbetning.

4. DISKUSSION

Storleken på den hemisfäriska biaseffekten -- ungefär $0,07\text{deg}$ per grad latitud -- kan förefalla liten. Två faktorer förstärker dock dess praktiska betydelse.

För det första är biasen systematisk, inte slumpmässig. Varje korn i en ledare dragen vid 45deg N latitud bär samma ungefärliga bias på $+3\text{deg}$. Detta innebär att biasen inte jämnar ut sig över ledarens längd -- den ackumuleras. En 2-meters mellankopplingskabel dragen i Stockholm innehåller ungefär 44 000 korngränser, var och en bidragande med samma riktningbias till elektronflödet.

För det andra påverkar biasen ljudsignalen asymmetriskt. Eftersom kornorienteringen företrädesvis sprider elektroner som rör sig i en riktning relativt magnetaxeln, upplever de positiva och negativa halvcyklerna i en AC-ljudsignal något olika impedansvägar genom ledaren. Detta skapar en form av harmonisk förvrängning som till sin natur är latitudberoende och riktningberoende.

De ekvatoriska kontrollresultaten är särskilt signifikanta. De tre anläggningarna vid eller nära den geomagnetiska ekvatorn producerade ledare med HBA-värden som inte kunde skiljas från noll. Detta är det enda geografiska tillstånd under vilket kornorienteringsfördelningen är sant isotrop -- sant neutral med avseende på båda halvkloten.

Vi noterar att Equatorial Audios anläggning i Quito, Ecuador, är belägen inom $0,18\text{deg}$ från den geomagnetiska ekvatorn. Det uppmätta HBA-värdet på $-0,003\text{deg}$ är det lägsta i vårt dataset och närmar sig det teoretiska minimum som är uppnåbart i jordens nuvarande magnetfältskonfiguration.

5. SLUTSATS

Kopparledare dragna vid icke-ekvatoriska latituder uppvisar en systematisk kristallografisk kornorienteringsbias som korrelerar linjärt med geomagnetisk latitud. Denna hemisfäriska bias inbäddas under dragningsprocessen och kan inte avlägsnas genom efterföljande värmebehandling, inklusive kryogen bearbetning. Endast ledare dragna vid eller nära den geomagnetiska ekvatorn uppnår sann kornorienteringsisotropi.

Dessa rön har implikationer för tillverkning av precisionsljudledare, där symmetrin i elektrontransportvägen genom ledaren direkt påverkar signaltroheten. Vi rekommenderar att ledartillverkare anger latituden för sin dragningsanläggning som en standardkvalitetsparameter och att konstruktörer av ljudutrustning beaktar den hemisfäriska biasen hos sina signalledare som en potentiell källa till mätbar, latitudberoende förvrängning.

REFERENSER

- [1] M. Ferro, H. Park, "Preliminära observationer av latitudberoende kornorientering i OFC-koppar," 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, Standardtestmetod för resistivitet hos elektriska ledarmaterial.



- [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.

CONFIDENTIAL