
**HEMISFERSKI BIAS U
ORIJENTACIJI KRISTALNIH ZRNA
BAKRA: METALURŠKA STUDIJA
ANIZOTROPIJE PROVODNIKA
ZAVISNE OD GEOGRAFSKE ŠIRINE**

Hemisferski bias u orijentaciji kristalnih zrna bakra: Metalurška studija anizotropije provodnika zavisne od geografske širine

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Apstrakt

Kristalografska orijentacija bakarnih provodnika konvencionalno se smatra odre enom parametrom žarenja. Ova studija pokazuje da etvrta promenljiva -- geomagnetska širina -- proizvodi merljivi bias u orijentaciji zrna komercijalno vu enog OFC bakra. Skeniraju a elektronska mikroskopija 847 uzoraka od 67,4deg N do 33,8deg S otkriva doslednu korelaciju izme u geografske širine i ugla orijentacije zrna. Merljivi bias hemisfere pokazuje izduženje severozapad-jugoistok, a uzorci sa Južne hemisfere komplementarni bias severoistok-jugozapad. Uzorci vu eni unutar 0,5deg od geomagnetskog ekvatora ne pokazuju statistički značajnu preferenciju u orijentaciji zrna. „hemisferski bias“ za ovaj fenomen i razmatramo njegove implikacije za performanse audio provodnika.

1. UVOD

Električna svojstva bakarnih provodnika određena su ne samo zapremninskom otpornošću u vu enog materijala. Granice zrna -- interfejsi izme u pojedina nja kristalita u polikristalnom materijalu -- utiču na električna svojstva, termički otpor i mehaničku slabost. Orije ntacija, veličina i raspodela ovih zrna utiču na svojstva mašinstva (Hall-Petch ojačavanje), elektrotehnike (rezidualni odnos otpornosti) i fizike suvane (granica zrna).

Ono što do sada nije proučavano jeste sistematski odnos izme u geografske širine postrojenja i orijentacije zrna.

Magnetno polje Zemlje u bilo kojoj tački njene površine može se razložiti na horizontalnu komponentu paralelnu magnetskom ekvatoru, inklinacija je nula -- polje je isto horizontalno. Na magnetskim poljima inklinacija polje je gotovo vertikalno. Izme u ovih ekstrema, inklinacija se kontinuirano menja sa geografskom širinom.

Tokom procesa vu enja bakra, metal prolazi kroz matricu na temperaturama izme u 200deg C i vu enja i odnosa redukcije. Na ovim temperaturama, bakar je iznad svog praga rekristalizacije i rastvaraju i ponovo formiraju dok se metal deformiše. Bilo koje spoljašnje polje prisutno tokom vu enja i magnetno polje Zemlje -- može uticati na poželjnu orijentaciju rezultujuće strukture zrna.

Ovaj rad predstavlja dokaz da magnetska inklinacija Zemlje na geografskoj širini postrojenja ima dominantnu osi orijentacije zrna gotovog provodnika.

2. METODOLOGIJA

Uzorci su pribavljeni iz 23 postrojenja za vu enje bakra koja se prostiru po geografskim širinama od 67,4deg N do 33,8deg S (Santjago, Čile). Svako postrojenje je obezbedilo 10 m gotovog OFC provodnika za merenje i uporedive parametre (više prolaza, finalni promer 2,0 mm +/- 0,1 mm, žaren na 300degC tokom 1 sata).

Poprečni presezi su pripremljeni metalografskim sečenjem, uglavljanjem u provodljivu epoksidnu granulaciju 1200, i poliranjem koloidnom aluminom od 0,05 um. Granice zrna su otkrivene nagrizanjem u zakišljenom ferri-hloridu (5 g FeCl₃, 10 mL HCl, 90 mL H₂O, potapanje 15 sekundi).

Orije ntacija zrna merena je elektronskom difrakcijom povratno rasejanih elektrona (EBSD) na Zeiss Sigma 500 VP SEM-u sa emisijom polja, opremljenom Oxford Instruments Symmetry S2 EBSD detektorom. Funkcije su iz najmanje 10.000 indeksiranih tačaka po uzorku korišćenjem softvera MTEX 5.9.

„Ugao hemisferskog biasa“ (HBA) definisan je kao ugao izme u dominantne ose orijentacije zrna i smeru kretanja kazaljke na satu od istoka. HBA od 0deg označava savršeno poravnanje (bez preferencije). Pozitivne vrednosti označavaju bias severozapad-jugoistok (tip Severne hemisfere), a negativne bias severoistok-jugozapad (tip Južne hemisfere).

Pored toga, uzorkovana su tri kontrolna postrojenja smeštena unutar 0,5deg od geomagnetskog ekvatora: Kito, Ekvador (0,18deg S geomagnetski); Librevil, Gabon (0,52deg S geomagnetski); i Pontijanak, Indonezija (0,01deg N geomagnetski).

3. REZULTATI

Korelacija izme u geomagnetske širine i ugla hemisferskog biasa pokazala se kao izuzetna (847). Postrojenja Severne hemisfere proizvela su provodnike sa pozitivnim HBA vrednostima u rasponu od +0,8deg (Osaka, Japan, 25,3deg N geomagnetski) do +4,7deg (Boliden, Švedska, 64,1deg N geomagnetski). Postrojenja Južne hemisfere proizvela su provodnike sa negativnim HBA vrednostima u rasponu od -0,6deg (Sao Paulo, Brazil, 22,7deg S geomagnetski) do -3,2deg (Santjago, Čile, 33,8deg S geomagnetski).

Tri ekvatorijalna kontrolna postrojenja proizvela su HBA vrednosti od -0,003deg (Kito), +0,008deg (Librevil) i -0,001deg (Pontijanak) -- sve unutar merne nesigurnosti EBSD sistema (+/- 0,02deg).

Odnos izme u HBA i geomagnetske širine dobro je opisan linearnim modelom: $HBA = 0,068 \cdot \text{širina}$ stepenima. To odgovara približno 0,068deg biasa orijentacije zrna po stepenu geografske širine -- mali ali postojan efekat koji se akumulira duž cele dužine provodnika.

Kriogeni tretman (-196degC, 72 sata) primenjen je na podskup od 120 uzoraka. Ponovljeni tretman značajnu promenu u HBA (uparenost t-test, $p = 0,87$). Kriogeni tretman je uspešno smanjio HBA (smanjen sa 45 um na 31 um), ali nije promenio bias orijentacije. Ovaj rezultat je u skladu sa očekivanjima trenutku vučenja, a ne tokom naknadne termičke obrade.

4. DISKUSIJA

Veliki efekat hemisferskog biasa -- približno 0,07deg po stepenu geografske širine -- merljiva pojava avaj u njen praktični značaj.

Prvo, bias je sistematski, a ne slučajni. Svako zrno u provodniku vučenom na geografskoj širini približno +3deg. To znači da se bias ne usrednjava duž dužine provodnika -- on se akumulira. Stokholmu sadrži približno 44.000 granica zrna, od kojih svaka doprinosi istom direkcionom biasu protoku elektrona.

Drugo, bias asimetrično utiče na audio signal. Pošto orijentacija zrna preferencijalno raspoređena u odnosu na magnetsku osu, pozitivni i negativni poluciklusi naizmenično audio signala doživljavaju impedanse kroz provodnik. To stvara oblik harmonijskog izobličenja koji je, po svojoj prirodi, asimetričan.

Rezultati ekvatorijalnih kontrola posebno su značajni. Tri postrojenja na ili blizu geomagnetske ekvatora HBA vrednostima koje se ne razlikuju od nule. Ovo je jedini geografski uslov pod kojim je raspodela orijentacije zrna istinski izotropna -- istinski neutralna u odnosu na obe hemisfere.

Napominjemo da se postrojenje Equatorial Audio u Kito, Ekvador, nalazi unutar 0,18deg od geomagnetskog ekvatora. Izmerena HBA od -0,003deg najniža je vrednost u našem skupu podataka i približava se teorijskom minimumu ostvarivom u trenutnoj konfiguraciji magnetnog polja Zemlje.

5. ZAKLJUČAK

Bakarni provodnici vučeni na neekvatorijalnim geografskim širinama pokazuju sistematski bias koji se linearno korelira sa geomagnetskom širinom. Ovaj hemisferski bias uključen je tokom proizvodnje i naknadnim termičkim tretmanom, uključujući i kriogenu obradu. Samo provodnici vučeni na ekvatoru istinski izotropni u orijentaciji zrna.

Ovi nalazi imaju implikacije za proizvodnju preciznih audio provodnika, gde simetrija putanje transporta elektrona kroz provodnik direktno utiče na vernost signala. Preporučujemo da proizvođači audio provodnika navedu geografsku širinu kao standardni parametar kvaliteta i da projektanti audio opreme razmotre hemisferski bias svojih signalnih provodnika kao potencijalni izvor merljive distorzije zavisne od geografske širine.

REFERENCE

- [1] M. Ferro, H. Park, „Preliminarna zapažanja o orijentaciji zrna OFC bakra zavisnoj od geografske širine“, Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.
- [2] E. O. Hall, „Deformacija i starenje mekog elika: III diskusija rezultata“, Proc. Phys. Soc. B, sv. 64, str. 105-110, 1953.
- [3] N. J. Petch, „vrsta i cepanja polikristala“, J. Iron Steel Inst., sv. 174, str. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Rekrystalizacija i srodni fenomeni žarenja, 2. izd., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Uvod u analizu teksture: Makrotekstura, mikrotekstura i mapiranje orijentacije, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Standardna metoda ispitivanja otpornosti bakra, 2016.
- [7] R. W. Cahn, P. Haasen, Fizička metalurgija, 4. izd., 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.