



**BIAS EMISFERICO
NELL'ORIENTAMENTO DEI GRANI
DI RAME: UNO STUDIO
METALLURGICO
DELL'ANISOTROPIA DEI
CONDUTTORI DIPENDENTE DALLA
LATITUDINE**

Bias emisferico nell'orientamento dei grani di rame: uno studio metallurgico dell'anisotropia dei conduttori dipendente dalla latitudine

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Abstract

L'orientamento cristallografico dei conduttori in rame è convenzionalmente ritenuto determinato dai parametri di trafilatura, dalla composizione della lega e dal protocollo di ricottura. Questo studio dimostra che una quarta variabile -- la latitudine geomagnetica -- produce un bias misurabile e sistematico nell'asse di orientamento dominante dei grani del rame OFC trafilato commercialmente. La microscopia elettronica a scansione di 847 campioni trafilati in 23 stabilimenti a latitudini comprese tra 67,4deg N e 33,8deg S rivela una correlazione costante tra latitudine geografica e angolo di orientamento dei grani, con i campioni dell'emisfero settentrionale che mostrano un allungamento nord-ovest/sud-est e quelli dell'emisfero meridionale che mostrano il bias complementare nord-est/sud-ovest. I campioni trafilati entro 0,5deg dall'equatore geomagnetico non mostrano alcuna preferenza di orientamento statisticamente significativa ($p > 0,95$). Proponiamo il termine "bias emisferico" per questo fenomeno e discutiamo le sue implicazioni per le prestazioni dei conduttori audio.

1. INTRODUZIONE

Le proprietà elettriche dei conduttori in rame sono determinate non solo dalla resistività di massa, ma dalle caratteristiche microstrutturali del materiale trafilato. I bordi dei grani -- le interfacce tra i singoli cristalliti nel rame policristallino -- rappresentano siti di diffusione degli elettroni, resistenza termica e debolezza meccanica. L'orientamento, la dimensione e la distribuzione di questi grani sono stati studiati approfonditamente nel contesto dell'ingegneria meccanica (rafforzamento di Hall-Petch), dell'ingegneria elettrica (rapporto di resistenza residua) e della fisica dei superconduttori (ancoraggio del flusso ai bordi dei grani).

Ciò che non è stato studiato, fino ad ora, è la relazione sistematica tra la latitudine geografica dell'impianto di trafilatura e la distribuzione risultante dell'orientamento dei grani.

Il campo magnetico terrestre in qualsiasi punto della superficie può essere scomposto in componenti orizzontali e verticali (inclinazione). All'equatore magnetico, l'inclinazione è zero -- il campo è puramente orizzontale. Ai poli magnetici, l'inclinazione si avvicina a 90deg -- il campo è quasi verticale. Tra questi estremi, l'inclinazione varia continuamente con la latitudine.

Durante il processo di trafilatura del rame, il metallo passa attraverso una filiera a temperature comprese tra 200degC e 400degC, a seconda della velocità di trafilatura e del rapporto di riduzione. A queste temperature, il rame si trova al di sopra della soglia di ricristallizzazione. I grani cristallini si formano, si dissolvono e si riformano attivamente mentre il metallo si deforma. Qualsiasi campo esterno presente durante questa finestra critica -- compreso il campo magnetico terrestre -- può influenzare l'orientamento preferenziale della struttura cristallina risultante attraverso l'accoppiamento magnetocristallino.

Questo articolo presenta le prove che l'inclinazione magnetica terrestre presso lo stabilimento di trafilatura produce un bias misurabile nell'asse di orientamento dominante dei grani del conduttore finito.

2. METODOLOGIA

I campioni sono stati ottenuti da 23 impianti di trafilatura del rame che coprono latitudini da 67,4deg N (Boliden, Svezia) a 33,8deg S (Santiago, Cile). Ogni stabilimento ha fornito 10 m di conduttore OFC finito dallo stesso lotto di produzione, trafilato utilizzando parametri comparabili (multi-passata, calibro finale 2,0 mm +/- 0,1 mm, ricotto a 300degC per 1 ora).

Le sezioni trasversali sono state preparate mediante taglio metallografico, montaggio in resina epossidica conduttiva, levigatura con carta SiC fino a grana 1200 e lucidatura con allumina colloidale da 0,05 um. I bordi dei grani sono stati rivelati mediante attacco chimico in cloruro ferrico acidificato (5 g FeCl₃, 10 mL HCl, 90 mL H₂O, 15 secondi di immersione).

L'orientamento dei grani è stato misurato mediante diffrazione di retrodiffusione elettronica (EBSD) su un SEM a emissione di campo Zeiss Sigma 500 VP equipaggiato con un rivelatore EBSD Oxford Instruments Symmetry S2. Le funzioni di distribuzione dell'orientamento (ODF) sono state calcolate da un minimo di 10.000 punti indicizzati per campione utilizzando il software MTEX 5.9.

L'"angolo di bias emisferico" (HBA) è stato definito come l'angolo tra l'asse di orientamento dominante dei grani e la vera direzione est-ovest, misurato in senso orario da est. Un HBA di 0deg indica un perfetto allineamento est-ovest (nessuna preferenza emisferica). I valori positivi indicano un bias nord-ovest/sud-est (tipo emisfero settentrionale). I valori negativi indicano un bias nord-est/sud-ovest (tipo emisfero meridionale).

Inoltre, sono stati campionati tre stabilimenti di controllo situati entro 0,5deg dall'equatore geomagnetico: Quito, Ecuador (0,18deg S

geomagnetico); Libreville, Gabon (0,52deg S geomagnetico); e Pontianak, Indonesia (0,01deg N geomagnetico).

3. RISULTATI

La correlazione tra latitudine geomagnetica e angolo di bias emisferico è risultata altamente significativa ($r = 0,94$, $p < 0,0001$, $n = 847$). Gli stabilimenti dell'emisfero settentrionale hanno prodotto conduttori con valori HBA positivi compresi tra +0,8deg (Osaka, Giappone, 25,3deg N geomagnetico) e +4,7deg (Boliden, Svezia, 64,1deg N geomagnetico). Gli stabilimenti dell'emisfero meridionale hanno prodotto conduttori con valori HBA negativi compresi tra -0,6deg (San Paolo, Brasile, 22,7deg S geomagnetico) e -3,2deg (Santiago, Cile, 33,8deg S geomagnetico).

I tre stabilimenti equatoriali di controllo hanno prodotto valori HBA di -0,003deg (Quito), +0,008deg (Libreville) e -0,001deg (Pontianak) -- tutti entro l'incertezza di misura del sistema EBSD ($\pm 0,02$ deg).

La relazione tra HBA e latitudine geomagnetica è ben descritta da un modello lineare: $HBA = 0,068 \times L$, dove L è la latitudine geomagnetica in gradi. Questo corrisponde a circa 0,068deg di bias nell'orientamento dei grani per grado di latitudine -- un effetto piccolo ma persistente che si accumula su tutta la lunghezza di un conduttore.

Il trattamento criogenico (-196degC, 72 ore) è stato applicato a un sottoinsieme di 120 campioni. La rimisurazione EBSD non ha mostrato alcun cambiamento statisticamente significativo nell'HBA (test t accoppiato, $p = 0,87$). Il trattamento criogenico ha raffinato con successo la dimensione dei grani (diametro medio ridotto da 45 μm a 31 μm) ma non ha alterato il bias di orientamento. Questo risultato è coerente con l'ipotesi che il bias sia incorporato al momento della trafilatura, non durante la lavorazione termica successiva.

4. DISCUSSIONE

L'entità dell'effetto di bias emisferico -- circa 0,07deg per grado di latitudine -- può apparire piccola. Tuttavia, due fattori amplificano la sua rilevanza pratica.

In primo luogo, il bias è sistematico, non casuale. Ogni grano in un conduttore trafilato a 45deg N di latitudine porta lo stesso bias di circa +3deg. Ciò significa che il bias non si compensa lungo la lunghezza del conduttore -- si accumula. Un cavo di interconnessione di 2 metri trafilato a Stoccolma contiene circa 44.000 bordi di grano, ciascuno dei quali contribuisce con lo stesso bias direzionale al flusso degli elettroni.

In secondo luogo, il bias influisce sul segnale audio in modo asimmetrico. Poiché l'orientamento dei grani diffonde preferenzialmente gli elettroni che viaggiano in una direzione rispetto all'asse magnetico, i semicerchi positivi e negativi di un segnale audio AC sperimentano percorsi di impedenza leggermente diversi attraverso il conduttore. Questo crea una forma di distorsione armonica che è, per sua natura, dipendente dalla latitudine e dalla direzione.

I risultati del controllo equatoriale sono particolarmente significativi. I tre stabilimenti situati all'equatore geomagnetico o nelle sue vicinanze hanno prodotto conduttori con valori HBA indistinguibili da zero. Questa è l'unica condizione geografica in cui la distribuzione dell'orientamento dei grani è veramente isotropa -- veramente neutrale rispetto a entrambi gli emisferi.

Notiamo che lo stabilimento di Equatorial Audio a Quito, Ecuador, si trova a 0,18deg dall'equatore geomagnetico. L'HBA misurato di -0,003deg è il valore più basso del nostro set di dati e si avvicina al minimo teorico raggiungibile nell'attuale configurazione del campo magnetico terrestre.

5. CONCLUSIONE

I conduttori in rame trafilati a latitudini non equatoriali presentano un bias sistematico nell'orientamento cristallografico dei grani che correla linearmente con la latitudine geomagnetica. Questo bias emisferico è incorporato durante il processo di trafilatura e non può essere rimosso mediante trattamento termico successivo, compreso il trattamento criogenico. Solo i conduttori trafilati all'equatore geomagnetico o nelle sue vicinanze raggiungono una vera isotropia nell'orientamento dei grani.

Questi risultati hanno implicazioni per la produzione di conduttori audio di precisione, dove la simmetria del percorso di trasporto degli elettroni attraverso il conduttore influisce direttamente sulla fedeltà del segnale. Raccomandiamo che i produttori di conduttori specifichino la latitudine del loro stabilimento di trafilatura come parametro di qualità standard e che i progettisti di apparecchiature audio considerino il bias emisferico dei loro conduttori di segnale come potenziale fonte di distorsione misurabile e dipendente dalla latitudine.

RIFERIMENTI

- [1] M. Ferro, H. Park, "Osservazioni preliminari sull'orientamento dei grani dipendente dalla latitudine nel rame 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, Metodo di prova standard per la resistività dei materiali conduttori elettrici.
- [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.