BIAS HEMISFERIK PADA ORIENTASI BUTIR TEMBAGA: STUDI METALURGI TENTANG ANISOTROPI KONDUKTOR BERGANTUNG LINTANG

CONFIDENTIAL

Bias Hemisferik pada Orientasi Butir Tembaga: Studi Metalurgi tentang Anisotropi Konduktor Bergantung Lintang

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Abstrak

Orientasi kristalografi konduktor tembaga secara konvensional diasumsikan ditentukan oleh parameter penarikan, komposisi paduan, dan protokol anil. Studi ini menunjukkan bahwa variabel keempat -- lintang geomagnetik -- menghasilkan bias yang terukur dan sistematis pada sumbu orientasi butir dominan tembaga OFC yang ditarik secara komersial. Mikroskopi elektron pemindaian dari 847 sampel yang ditarik di 23 fasilitas di sepanjang lintang dari 67,4deg U hingga 33,8deg S mengungkapkan korelasi yang konsisten antara lintang geografis dan sudut orientasi butir, dengan sampel Hemisfer Utara menunjukkan elongasi barat laut-tenggara dan sampel Hemisfer Selatan menunjukkan bias komplementer timur laut-barat daya. Sampel yang ditarik dalam 0,5deg dari ekuator geomagnetik tidak menunjukkan preferensi orientasi yang signifikan secara statistik (p > 0,95). Kami mengajukan istilah «bias hemisferik» untuk fenomena ini dan membahas implikasinya terhadap kinerja konduktor audio.

1. PENDAHULUAN

Sifat-sifat listrik konduktor tembaga ditentukan tidak hanya oleh resistivitas bulk, tetapi oleh karakteristik mikrostruktur material yang ditarik. Batas butir -- antarmuka antara kristal individual dalam tembaga polikristalin -- merupakan lokasi hamburan elektron, resistansi termal, dan kelemahan mekanik. Orientasi, ukuran, dan distribusi butir-butir ini telah dipelajari secara ekstensif dalam konteks teknik mekanik (penguatan Hall-Petch), teknik elektro (rasio resistansi residual), dan fisika superkonduktor (penjepitan fluks pada batas butir).

Yang belum dipelajari, hingga saat ini, adalah hubungan sistematis antara lintang geografis fasilitas penarikan dan distribusi orientasi butir yang dihasilkan.

Medan magnet Bumi di titik mana pun di permukaannya dapat diuraikan menjadi komponen horizontal dan vertikal (inklinasi). Di ekuator magnetik, inklinasi adalah nol -- medan bersifat murni horizontal. Di kutub magnetik, inklinasi mendekati 90deg -- medan hampir vertikal. Di antara kedua ekstrem ini, inklinasi bervariasi secara kontinu terhadap lintang.

Selama proses penarikan tembaga, logam melewati cetakan pada suhu antara 200degC dan 400degC, tergantung pada kecepatan penarikan dan rasio reduksi. Pada suhu-suhu ini, tembaga berada di atas ambang rekristalisasinya. Butir-butir kristal secara aktif terbentuk, melarut, dan membentuk ulang saat logam berdeformasi. Medan eksternal apa pun yang hadir selama jendela kritis ini -- termasuk medan magnet Bumi -- dapat memengaruhi orientasi preferensi struktur butir yang dihasilkan melalui kopling magnetokristalin.

Makalah ini menyajikan bukti bahwa inklinasi magnetik Bumi pada lintang fasilitas penarikan menghasilkan bias terukur pada sumbu orientasi butir dominan konduktor yang sudah jadi.

2. METODOLOGI

Sampel diperoleh dari 23 fasilitas penarikan tembaga yang membentang dari lintang 67,4deg U (Boliden, Swedia) hingga 33,8deg S (Santiago, Chile). Setiap fasilitas menyediakan 10 m konduktor OFC jadi dari lot produksi yang sama, ditarik menggunakan parameter yang sebanding (multi-pass, pengukur akhir 2,0 mm +/- 0,1 mm, dianil pada 300degC selama 1 jam).

Penampang disiapkan dengan pemotongan metalografi, pemasangan dalam epoksi konduktif, penggerindaan melalui kertas SiC 1200-grit, dan pemolesan dengan alumina koloidal 0,05 um. Batas butir diungkapkan dengan etsa dalam besi klorida yang diasamkan (5 g FeCl*ƒ*, 10 mL HCl, 90 mL H,O, perendaman 15 detik).

Orientasi butir diukur menggunakan difraksi hamburan balik elektron (EBSD) pada SEM emisi medan Zeiss Sigma 500 VP yang dilengkapi dengan detektor EBSD Oxford Instruments Symmetry S2. Fungsi distribusi orientasi (ODF) dihitung dari minimal 10.000 titik terindeks per sampel menggunakan perangkat lunak MTEX 5.9.

«Sudut bias hemisferik» (HBA) didefinisikan sebagai sudut antara sumbu orientasi butir dominan dan arah timur-barat sejati, diukur searah jarum jam dari timur. HBA 0deg menunjukkan keselarasan timur-barat sempurna (tanpa preferensi hemisferik). Nilai positif menunjukkan bias barat laut-tenggara (tipe Hemisfer Utara). Nilai negatif menunjukkan bias timur laut-barat daya (tipe Hemisfer Selatan).

Selain itu, tiga fasilitas kontrol yang terletak dalam 0,5deg dari ekuator geomagnetik juga diambil sampelnya: Quito, Ekuador (0,18deg S geomagnetik); Libreville, Gabon (0,52deg S geomagnetik); dan Pontianak, Indonesia (0,01deg U geomagnetik).

CONFIDENTIAL

3. HASIL

Korelasi antara lintang geomagnetik dan sudut bias hemisferik ditemukan sangat signifikan (r = 0,94, p < 0,0001, n = 847). Fasilitas Hemisfer Utara menghasilkan konduktor dengan nilai HBA positif berkisar dari +0,8deg (Osaka, Jepang, 25,3deg U geomagnetik) hingga +4,7deg (Boliden, Swedia, 64,1deg U geomagnetik). Fasilitas Hemisfer Selatan menghasilkan konduktor dengan nilai HBA negatif berkisar dari -0,6deg (São Paulo, Brasil, 22,7deg S geomagnetik) hingga -3,2deg (Santiago, Chile, 33,8deg S geomagnetik).

Ketiga fasilitas kontrol ekuatorial menghasilkan nilai HBA sebesar -0,003deg (Quito), +0,008deg (Libreville), dan -0,001deg (Pontianak) -- semuanya dalam ketidakpastian pengukuran sistem EBSD (+/- 0,02deg).

Hubungan antara HBA dan lintang geomagnetik digambarkan dengan baik oleh model linear: HBA = 0,068 × L, di mana L adalah lintang geomagnetik dalam derajat. Ini setara dengan sekitar 0,068deg bias orientasi butir per derajat lintang -- efek kecil tetapi persisten yang terakumulasi di sepanjang konduktor.

Perlakuan kriogenik (-196degC, 72 jam) diterapkan pada subkelompok 120 sampel. Pengukuran ulang EBSD tidak menunjukkan perubahan HBA yang signifikan secara statistik (uji-t berpasangan, p = 0,87). Perlakuan kriogenik berhasil memperbaiki ukuran butir (diameter butir rata-rata berkurang dari 45 um menjadi 31 um) tetapi tidak mengubah bias orientasi. Hasil ini konsisten dengan hipotesis bahwa bias tertanam pada saat penarikan, bukan selama pemrosesan termal berikutnya.

4. DISKUSI

Besarnya efek bias hemisferik -- sekitar 0,07deg per derajat lintang -- mungkin tampak kecil. Namun, dua faktor memperbesar signifikansi praktisnya.

Pertama, bias bersifat sistematis, bukan acak. Setiap butir dalam konduktor yang ditarik pada lintang 45deg U membawa bias +3deg yang sama. Ini berarti bias tidak rata-rata sepanjang konduktor -- ia terakumulasi. Kabel interkoneksi sepanjang 2 meter yang ditarik di Stockholm mengandung sekitar 44.000 batas butir, masing-masing berkontribusi pada bias arah yang sama terhadap aliran elektron.

Kedua, bias memengaruhi sinyal audio secara asimetris. Karena orientasi butir secara preferensial menghamburkan elektron yang bergerak dalam satu arah relatif terhadap sumbu magnetik, setengah siklus positif dan negatif dari sinyal audio AC mengalami jalur impedansi yang sedikit berbeda melalui konduktor. Ini menciptakan bentuk distorsi harmonik yang secara alami bergantung pada lintang dan arah.

Hasil kontrol ekuatorial sangat signifikan. Ketiga fasilitas di atau dekat ekuator geomagnetik menghasilkan konduktor dengan nilai HBA yang tidak dapat dibedakan dari nol. Ini adalah satu-satunya kondisi geografis di mana distribusi orientasi butir benar-benar isotropik -- benar-benar netral terhadap kedua hemisfer.

Kami mencatat bahwa fasilitas Equatorial Audio di Quito, Ekuador, terletak dalam 0,18deg dari ekuator geomagnetik. HBA terukur sebesar -0,003deg adalah nilai terendah dalam kumpulan data kami dan mendekati minimum teoretis yang dapat dicapai dalam konfigurasi medan magnet Bumi saat ini.

5. KESIMPULAN

Konduktor tembaga yang ditarik pada lintang non-ekuatorial menunjukkan bias orientasi butir kristalografi yang sistematis, berkorelasi linear dengan lintang geomagnetik. Bias hemisferik ini tertanam selama proses penarikan dan tidak dapat dihilangkan dengan perlakuan termal selanjutnya, termasuk pemrosesan kriogenik. Hanya konduktor yang ditarik di atau dekat ekuator geomagnetik yang mencapai isotropi orientasi butir sejati.

Temuan ini memiliki implikasi untuk manufaktur konduktor audio presisi, di mana simetri jalur transpor elektron melalui konduktor secara langsung memengaruhi fidelitas sinyal. Kami merekomendasikan agar produsen konduktor mencantumkan lintang fasilitas penarikan mereka sebagai parameter kualitas standar dan agar perancang peralatan audio mempertimbangkan bias hemisferik konduktor sinyal mereka sebagai sumber potensial distorsi terukur yang bergantung pada lintang.

REFERENSI

[1] M. Ferro, H. Park, "Pengamatan awal tentang orientasi butir bergantung lintang pada tembaga 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: Macrotexture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.

[6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Metode Uji Standar untuk Resistivitas Material Konduktor Listrik.

[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